Facultat d'Òptica i Optometria de Terrassa

FÍSICA. Curso 2019-20

- **RESÚMENES**
- **PRESENTACIONES DE CLASE**
- **PROGRAMA**

N. Lupón
J. Pladellorens

Julio 2019

NOTA. –
Este dossier contiene:

- Un resumen de todas las lecciones del temario que se explican en el aula.
- La copia del material gráfico que el profesor/a utilizará en clase en formato de presentación sobre pantalla. En este caso, esto implica que las diapositivas contenidas en este dossier no cubren la totalidad del temario.
- El programa detallado de la asignatura.

ÍNDICE

Tema 3: LAS LEYES DE NEWTON

1.- *Principios fundamentales de la dinámica. Las leyes de Newton.*

- Las relaciones fundamentales de la mecánica clásica están contenidas en las leyes del movimiento de Newton.

  1ª Ley. Si la fuerza externa neta que actúa sobre un objeto es nula, entonces el objeto se mantiene su posición inicial de reposo o de movimiento con velocidad uniforme.

  2ª Ley. La aceleración de un objeto es inversamente proporcional a su masa y directamente proporcional a la fuerza externa neta que actúa sobre él:

$$\vec{a} = \frac{\sum \vec{F}_{ext}}{m} \qquad \text{o bien} \qquad \sum \vec{F}_{ext} = m\vec{a}$$

  3ª Ley. Las fuerzas siempre ocurren por pares. Si el cuerpo *A* ejerce una fuerza sobre el cuerpo *B*, éste ejerce sobre *A* una fuerza igual pero de sentido contrario.

- **UNIDADES**

	Masa	Fuerza	
S.I.	Kg	N	1N = 1Kg · 1m/s^2
Cgs	g	Dyna	1dyna = 1g · 1cm/s^2

2.- *Las fuerzas de la Naturaleza.*

- Todas las fuerzas observadas en la naturaleza pueden explicar-se a partir de cuatro interacciones básicas:
  - la fuerza gravitatoria;
  - la fuerza electromagnética;
  - la fuerza nuclear fuerte (también conocida como fuerza hadrónica);
  - la fuerza nuclear débil.

- Las fuerzas que observamos diariamente actuando sobre los cuerpos macroscópicos, como las de contacto, sustentación o fricción, y las realizadas mediante muelles y cuerdas se deben, en última instancia, a las fuerzas de enlace entre los átomos y moléculas que constituyen dichos cuerpos, cuerdas o muelles. Como es bien conocido, todas las fuerzas de enlace entre átomos tienen su origen en la interacción electromagnética.

- El peso *P* de un objeto es la fuerza de atracción gravitatoria que existe entre el objeto y la Tierra. Para cuerpos situados sobre la superficie de la tierra a alturas pequeñas comparadas con el radio de la Tierra el *Peso* es:

$$\vec{P} = m\vec{g}$$

  donde *m* es la masa del cuerpo i *g* la aceleración de la gravedad.

FísicaTema3

Leyes de Newton

1. Principios fundamentales de la mecánica clásica
2. Unidades de masa y fuerza
3. Las fuerzas de la naturaleza
4. Interacción gravitaroria: Ley de Newton de la gravitación universal

1. Principios fundamentales de la mecánica clásica

1ª Ley. Principio de inercia

$$\sum \vec{F}_{ext} = 0 \Rightarrow \begin{cases} \vec{v} = 0 \\ \vec{v} = ctn \end{cases}$$

2ª Ley.

(Concepto previo: cantidad de movimiento, $\vec{p} = m \cdot \vec{v}$).

$$\frac{d\vec{p}}{dt} = \sum \vec{F}_{ext}$$

Si m = cte, entonces : $\frac{d\vec{p}}{dt} = m \cdot \frac{d\vec{v}}{dt} = m \cdot \vec{a} = \sum \vec{F}_{ext}$

1. Principios fundamentales de la mecánica clásica

3ª Ley. Ley de acción y reacción

Si un cuerpo A ejerce una fuerza sobre otro B, $\vec{F}_{AB}$, éste ejerce una fuerza sobre A, $\vec{F}_{BA}$, igual y de sentido contrario a la primera.

$$\vec{F}_{AB} = -\vec{F}_{BA}$$

Corolario

Las fuerzas cumplen la ley de la suma del paralelogramo, es decir, son vectores.

2. Unidades de fuerza y masa

	Masa	Fuerza
S.I.	Kg	N
S. cgs.	g	dyna

$1Kg=10^3 g$

$1N = 10^5 dyna$

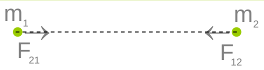
3. Las fuerzas de la naturaleza

- Interacción gravitatoria
- Interacción electromagnética (fuerzas de enlace)
- Interacción nuclear fuerte
- Interacción nuclear débil

4. Interacción gravitatoria

Ley de Newton de la gravitación universal

$$\left|\vec{F}_{12}\right| = \left|\vec{F}_{21}\right| = G\cdot\frac{m_1 m_2}{r^2}$$



Dirección: La de la recta que une las dos masas
Sentido: Atractivo

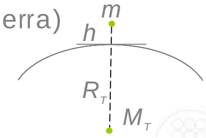
$G = 6.67\cdot 10^{-11} Nm^2/Kg^2$

$r \to$ Distancia entre partículas o, en caso de cuerpos extensos, entre sus centros de masa

Peso de un cuerpo (cerca de la superficie de la Tierra)

$$Peso = G\cdot\frac{M_T m}{(R_T+h)^2} \approx G\cdot\frac{M_T m}{R_T^{\ 2}} = g\cdot m$$

$\boxed{h \ll R_T}$

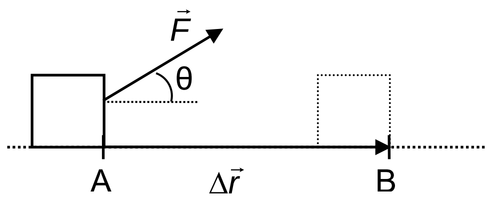


Tema 4: DINÀMICA DE LA PARTÍCULA

1.- *Trabajo. Unidades*

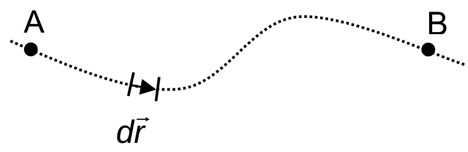
- Para un objeto que se desplaza desde un punto A hasta otro *B*, bajo la acción de una fuerza constante, el trabajo realizado por esta fuerza es:

$$W_{AB} = \vec{F} \cdot \Delta\vec{r} = F\Delta r \cos\theta = F_r \Delta r$$



- Para un objeto que se desplaza de *A* hasta *B* siguiendo una trayectoria cualquiera, bajo la acción de una fuerza variable, *F*,
    a. el trabajo realizado por la fuerza *F* sobre la partícula a la largo de un pequeño recorrido *dr* se expresa como

$$w = \vec{F} \cdot d\vec{r}$$



    b. el trabajo total realizado por *F* a lo largo del recorrido *AB* es:

$$W_{AB} = \sum w = \int_A^B \vec{F} \cdot d\vec{r}$$

- La unidad SI de trabajo es el joule (J):

$$1\ \text{J} = 1\ \text{N} \cdot 1\text{m}$$

2.- *Energía cinética*

- La energía cinética es la energía asociada al movimiento de un cuerpo y está relacionada con su masa y su velocidad por la expresión:

$$\varepsilon_c = \frac{1}{2} m v^2$$

- El teorema *trabajo–energía* establece que el trabajo realizado sobre una partícula por la resultante de las fuerzas que actúan sobre ella es igual a la variación de la energía cinética de la partícula.

$$W_{AB}^{res} = \Delta\varepsilon_c = \frac{1}{2} m v_B^2 - \frac{1}{2} m v_A^2$$

3.- *Fuerzas conservativas. Energía potencial*

- La energía potencial de un objeto es la energía asociada a su posición y siempre está vinculada a la existencia de una fuerza (fuerza conservativa). Su un cuerpo recorre el camino *AB* bajo la acción de una fuerza conservativa (entre otras) la variación de su energía potencial se define como:

$$\Delta U = U_B - U_A = -W_{AB}^{cons} = -\int_A^B \vec{F}_{cons} \cdot d\vec{r}$$

- La energía potencial gravitatoria de un cuerpo de masa *m* situado a una altura *h* por encima de un punto de referencia es

$$U = mgh$$

4.- *Conservación de la energia mecánica*

- La energía mecánica, *E*, de un cuerpo, es la suma de sus energías cinética y potencial.

$$E = \varepsilon_c + U = \frac{1}{2}mv^2 + U$$

Si sobre un objeto sólo actúa fuerzas conservativas, la energía mecánica del mismo no cambia a lo largo de su recorrido:

$$E_A = E_B = \text{Constante}$$

lo que se conoce como ***principio de conservación de la energía mecánica***.

- El trabajo realizado por una fuerza no conservativa que actúa sobre un cuerpo es igual a la variación de la energía mecánica total del sistema (*teorema generalizado trabajo-energía*):

$$W_{AB}^{nc} = \Delta E = E_B - E_A$$

El principio de conservación de la energía mecánica y el teorema generalizado del trabajo-energía pueden utilizarse como una alternativa de las leyes de Newton para resolver problemas de mecánica que requieren la determinación de la velocidad de una partícula en función de su posición.

5.- *Potencia. Unidades*

- La potencia es la energía transferida por unidad de tiempo de un sistema a otro. Si una fuerza *F* actúa sobre una partícula que se mueve con velocidad *v*, la potencia desarrollada por la fuerza es

$$P = \frac{w}{dt} = \vec{F} \cdot \vec{v}$$

La unidad SI de potencia es el Watt (W).

1W = 1J/1s

UNIDAD 2: MECÁNICA DE SÓLIDOS Y FLUIDOS

INTRODUCCIÓN

- La densidad, ρ, de una sustancia es el cociente entre su masa y su volumen (masa por unidad de volumen):

$$Densidad = \frac{masa}{Volumen}$$

$$\rho = \frac{m}{V}$$

- El valor de la densidad del agua es $\rho = 10^3$ Kg/m^3, en unidades del sistema internacional.

Las densidades de la mayoría de los sólidos y líquidos son aproximadamente independientes de la temperatura y de la presión, mientras que la de los gases depende fuertemente de estas magnitudes.

FísicaMódulo2

Mecánica de Solidos y Fluidos

ÒpticaiOptometria

INTRODUCCIÓN: Estados de la materia
La materia se encuentra principalmente en tres estados o fases posibles: ***sólido, liquido y gas***

SÓLIDO
• Fuerzas de enlace extraordinariamente grandes • Distancias interatómicas mínimas y fijas • Átomos o moléculas en posiciones relativas fijas (materia rígida) •Deformaciones mínimas

ÒpticaiOptometria 1/3

GAS (Presión baja)
• Fuerzas de enlace mínimas.
• Átomos o moléculas se mueven libremente
• Las posiciones relativas de sus átomos o moléculas cambian constantemente.

LÍQUIDO
• Fuerzas de enlace intermedias
• Distancias interatómicas parecidas a los sólidos
• Las posiciones relativas de sus átomos o moléculas pueden cambiar.

Densidad.

La densidad, **ρ**, de una sustancia se define como la masa por unidad de volumen

$$\rho = \frac{m}{V} \quad (\,Kg/m^3,\, g/cm^3\,)$$

Cu (Sólido)	H_2O (liquido)	Aire (Atmósfera)
$\rho = 8{,}9 \cdot 10^3$ Kg/m^3	$\rho = 10^3$ Kg/m^3	$\rho = 1{,}29$ Kg/m^3
	Hg (líquido)	
	$\rho = 13{,}6 \cdot 10^3$ Kg/m^3	

Valores del mismo orden

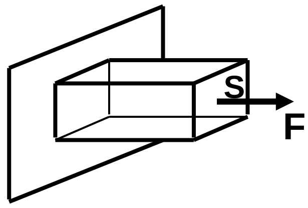
Tema 5 : PROPIEDADES ELÁSTICAS DE LOS MATERIALES

1.- *Cuerpos elásticos deformables*

- Cuando se aplica una fuerza sobre un cuerpo, este se deforma.

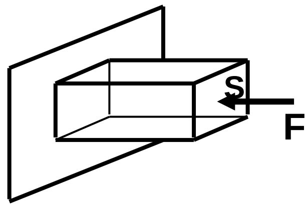
- Para valores pequeños de la deformación, ésta es proporcional a la fuerza que la produce.

2.- *Elasticidad por tracción o compresión*



- El esfuerzo de ***tracción***, σ, es la fuerza perpendicular por unidad de superficie aplicada a un cuerpo en el sentido "de alargarlo":

$$\sigma = \frac{F}{S}$$



- El esfuerzo de ***compresión*** es la fuerza perpendicular por unidad de superficie, aplicada en un cuerpo en sentido "de reducir su longitud".

- En ambos casos, la deformación unitaria longitudinal, ε, es el cociente entre la variación de la longitud del cuerpo, $\Delta\ell$, y su longitud inicial, ℓ_0.

$$\varepsilon = \frac{\Delta\ell}{\ell_0}$$

- Para valores pequeños, la deformación unitaria, ε, es proporcional al esfuerzo, σ, que la produce:

$$\varepsilon = \frac{1}{E}\sigma$$

  donde la constante E es el modulo de Young del material. Para algunos materiales, el módulo de Young para la tracción y la compresión tienen valores distintos.

3.- *Compresión uniforme.*

- En el caso de una *compresión uniforme*, el esfuerzo normal, ΔP actúa en todas direcciones sobre el objeto. Como consecuencia, el volumen del mismo disminuye ($\Delta V < 0$). También en este caso la deformación es proporcional al esfuerzo.

$$\frac{\Delta V}{V_0} = -\beta|\Delta P| = \frac{1}{\chi}|\Delta P|$$

  donde β es el coeficiente compresibilidad, y χ el módulo de compresibilidad del objeto o material.

FísicaTema5

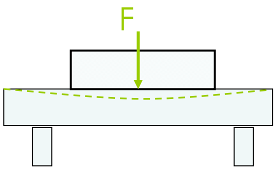
Propiedades elásticas de los materiales

1. Cuerpos elásticos deformables
2a. Tracción
2b. Compresión
3. Compresión uniforme

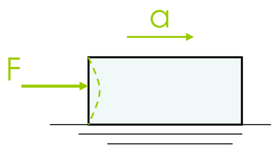
1. Cuerpos elásticos deformables

Efecto de una *fuerza* sobre un cuerpo → **Aceleración**

Efecto de una *fuerza* sobre un cuerpo → **Deformación**



Situación estática:
Solamente deformación.



Situación dinámica:
Deformación + aceleración.

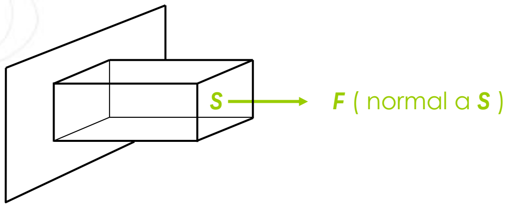
DEFORMACIÓN: cambio de forma y/o tamaño del cuerpo

- **Elástica** → cuando desaparece el esfuerzo el cuerpo **recupera** el tamaño i la forma iniciales (**fuerza** interna **recuperadora**).
- **Plástica** → cuando desaparece el esfuerzo el cuerpo **permanece** deformado

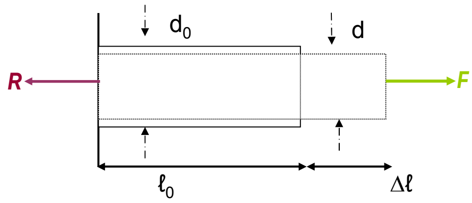
OBJETIVO

Estudiar la **relación** entre la **fuerza** aplicada sobre un cuerpo (sólido) y la **deformación** que se produce como consecuencia.

2.a. Tracción



$$\frac{F}{S} = \sigma$$
↑
Esfuerzo normal



¿FUERZA RECUPERADORA?

La barra está en **equilibrio** pero las fuerzas que actúan sobre ella tienden a **aumentar** su **longitud** y a **disminuir** su **sección** transversal.

2.a. Tracción

$\Delta\ell / \ell_0 = \varepsilon \rightarrow$ Deformación unitaria longitudinal

$\Delta d = d - d_0 \rightarrow$ Contracción transversal

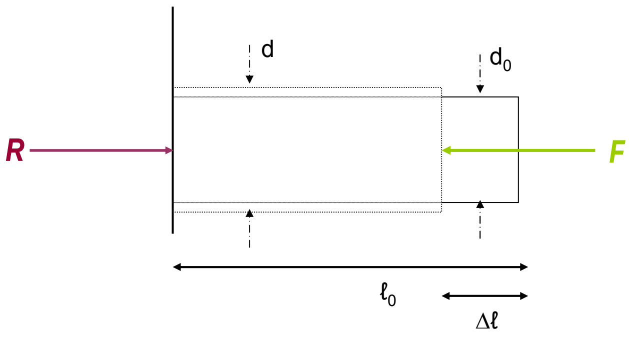
Esfuerzo : tracción $\Rightarrow$ deformación :
- Aumento de la longitud
- Contracción transversal

$\sigma > 0$; $\varepsilon > 0$; $\Delta d < 0$

$$-\Delta d / d_o = \mu \cdot \varepsilon$$

μ es el Coeficiente Poisson

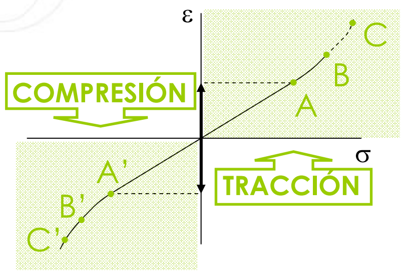
2.b Compresion



Esfuerzo: Compresión ⇒ deformación: • Disminución de la longitud
• Aumento transversal

$\boxed{\sigma < 0 \;;\; \varepsilon < 0 \;;\; \Delta d > 0}$

Relación esfuerzo ⇔ deformación (material fràgil)



0A : Zona elástica proporcional

$\varepsilon = (1/E) \cdot \sigma$ ⇒ Ley de Hooke

constante de proporcionalidad

E (N/m^2): Módulo de Young
(depende del material)

(E: tracción; E': compresión)

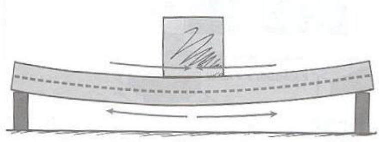
AB: Zona elástica no proporcional
B: Límite elástico
BC: Zona plástica (Deformaciones permanentes)
C: Punto de rotura
(coincide con el punto de esfuerzo máximo para los materiales frágiles)

Substancia	Módulo de Young 10^9 N/m²	Límite de elasticidad s_e 10^7 N/m²	Rotura a la tracción 10^7 N/m²	Rotura a la compresión 10^7 N/m²
Acero	200	30	50	
Aluminio	70	18	20	
Cobre	120	20	40	
Cuarzo	70			
Granito	50			20
Hierro, forjado	190	17	33	
Huesos				
Tracción	16		12	
Compresión	9			17
Ladrillo	20			4
Madera	10			10
Mármol	60			20
Poliestireno	3		5	10
Vidrio, cuarzo fundido	70		5	110

Para un valor dado del esfuerzo deformador:

- $E \uparrow \Rightarrow \varepsilon \downarrow$ (**"difícil"** de deformar)
- $E \downarrow \Rightarrow \varepsilon \uparrow$ (**"fácil"** de deformar)

FLEXIÓN: Deformación compleja que combina la tracción y la compresión (entre otras).



- Base **inferior** de la biga $\Delta\ell > 0 \rightarrow$ **tracción**
- Base **superior** de la biga $\Delta\ell < 0 \rightarrow$ **compresión**

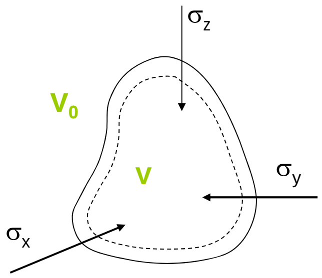
- $E \uparrow \Rightarrow$ flexión **"difícil"**
- $E \downarrow \Rightarrow$ flexión **"fácil"**

LENTES DE CONTACTO (LC)

- Material **elástico** para **recuperar su forma original** después de cada parpadeo.
- Al cerrarse, **el párpado** aplasta la lente contra la córnea → **flexiona la lente** sobre la córnea.
- El **módulo de Young** se considera un **indicador de confort** de la lente.
- **$E \downarrow \Rightarrow$ mejor nivel de confort.**

($E \sim 10^6$ N/m²)

3. Compresión uniforme.



$\sigma_x = \sigma_y = \sigma_z = \Delta P$

$V - V_0 = \Delta V < 0$

$$\boxed{\frac{\Delta V}{V_0} = -\beta \cdot \Delta P = -\frac{1}{\chi} \cdot \Delta P}$$

3. Compresión uniforme.

β : Coeficiente de Compresibilidad (m^2/N)

$\frac{1}{\beta} = \chi$: Módulo de Compresibilidad (N/m^2)

Cobre (**incompresible**) $\rightarrow \chi_{Cu} = 1{,}4 \cdot 10^{11}$ N/m^2

Agua (**incompresible**) $\rightarrow \chi_{H2O} = 24 \cdot 10^{9}$ N/m^2

Gas (**compresible**) $\rightarrow \chi_g = 1{,}4 \cdot 10^{5}$ N/m^2
(gas diatómico comprimido adiabáticamente a 1 atm)

Tema 6: ESTÀTICA DE FLUIDOS.

1. Introducción. Generalidades sobre fluidos.

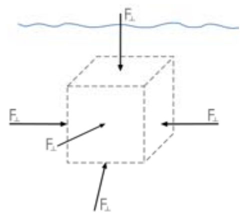
- Los gases y los líquidos son materiales que tienen capacidad de “fluir”, esto quiere decir que puede existir un movimiento relativo de unas partes del material respecto a los otros. Por eso, denominamos FLUIDOS tanto a los gases como a los líquidos.

- Los gases son fluidos compresibles y su densidad es variable. Los líquidos son fluidos incomprensibles y su densidad es constante.

2. Presión en el seno de un fluido. Principio de Pascal.

- La presión de un fluido es la fuerza normal por unidad de superficie

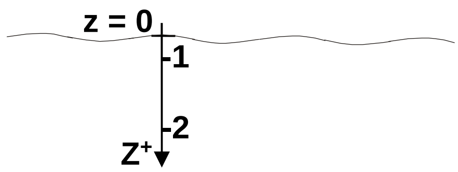
$$P = \frac{F_{\perp}}{S}$$



- El ***principio de Pascal*** establece que la presión aplicada a un líquido contenido en un recipiente se transmite íntegramente a todos los puntos del fluido y a las paredes del recipiente.

3. Estática de fluidos en el campo de la gravedad.

- En un líquido, como el agua, la presión aumenta linealmente con la profundidad:



$$P_2 - P_1 = \rho g(z_2 - z_1) > 0$$

4. Medida de presiones. Unidades de presión.

- La presión en un medio se mide con un ***manómetro.*** La ***presión manométrica***, es la sobrepresión en el medio respecto a la presión atmosférica. Entonces, si *P* es la presión absoluta en el medio:

$$P_{man} = (P - P_{atm})$$

- La unidad SI de presión es el pascal (1 Pa = 1N/m^2). Habitualmente se utilizan muchas otras unidades de presión, como la atmosfera, el bar, el torr, o el milímetro de mercurio. Estas unidades se relacionan:

$$1{,}01325 \cdot 10^5 \text{ Pa} = 1 \text{ atm} = 1{,}01325 \text{ bar} = 760 \text{ mmHg} = 760 \text{ torr}$$

5. Principio de Arquímedes.

- De acuerdo con el principio de Arquímedes un cuerpo sumergido total o parcialmente en un fluido experimenta una fuerza ascensional o ***empuje*** hacia arriba igual al peso del fluido desalojado por el cuerpo.

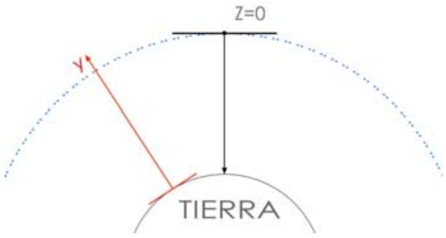
$$E = \rho_{fluido} V_{submergido} g$$

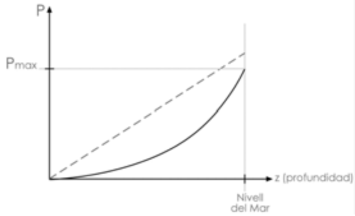
FísicaTema6

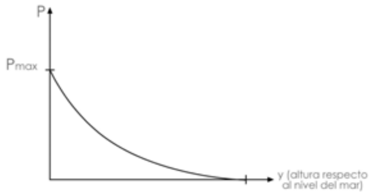
3. Estática de fluidos en el campo de la gravedad

· (b) Fluidos compresibles (gases)

→ Caso particular: presión atmosférica







La presión disminuye exponencialmente con la altitud

ÓpticaiOptometría

FísicaTema6

4. Unidades de Presión

SI	Pa(Pascal)	$1Pa=1N/1m^2$
Scgs	Baria	$1\ baria=1dyn/1cm^2$
		$1Pa=10barias$

1 bar = 10^5 Pa

1 mbar = 10^2 Pa = 1 HPa

1 atm = $1{,}013\cdot10^5$ Pa = 1013 HPa

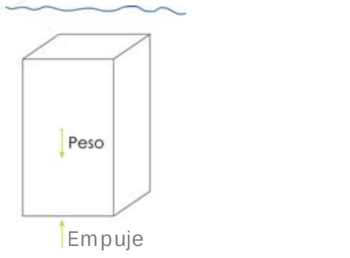
1 Torr= 1 mmHg = 133,32 Pa

1 atm = 760 Torr

ÓpticaiOptometría

5. Principio de Arquímedes

Cuerpo sumergido en un fluido

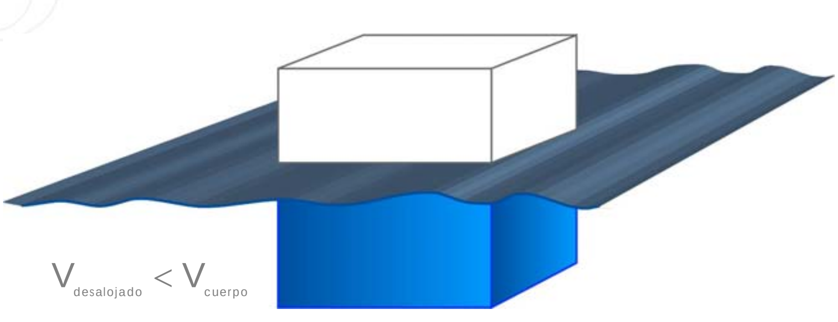


$$Peso = m_{cuerpo} \cdot g = \rho_{cuerpo} \cdot V_{cuerpo} \cdot g$$

$$E = m_{\substack{fluido \\ desalojado}} \cdot g = \rho_{fluido} \cdot V_{desalojado} \cdot g$$

Peso > E	El cuerpo se hunde
Peso = E	Equilibrio
Peso < E	El cuerpo va hacia arriba

5. Principio de Arquímedes



FLOTACIÓN

Peso = E

$$\rho_{cuerpo} \cdot V_{cuerpo} \cdot g = \rho_{fluido} \cdot V_{desalojado} \cdot g$$

Tema 7: DINÀMICA DE LOS FLUIDOS IDEALES.

1. Descripción del movimiento de un fluido ideal. Líneas de corriente.

- Las variables que se utilizan para describir el movimiento de un fluido son la densidad "ρ", la presión "P" y la velocidad "v".

- Las líneas de corriente, son líneas tangentes al vector velocidad en cada punto del espacio ocupado por el fluido.

2. Régimen de flujo. El fluido ideal.

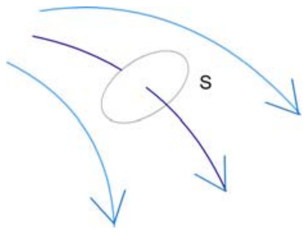
- Un flujo o corriente de fluido es ***estacionario*** si la velocidad del fluido en cada punto del espacio no cambia con el tiempo.

- Un flujo o corriente de fluido se considera ***laminar*** si el fluido se puede considerar dividido en "capas" o láminas que avanzan sin mezclar-se entre si.

- Un flujo o corriente de fluido se considera ***ideal*** si las fueras de viscosidad entre porciones de fluido juegan un papel irrelevante.

3. Caudal

- El caudal de una corriente de fluido se define como el volumen, *V*, de fluido que atraviesa por unidad de tiempo, una superficie predeterminada, *S*.



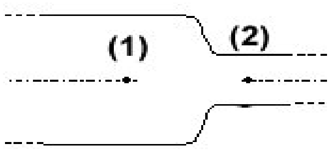
$$C = \frac{Volumen}{\Delta t}$$

Para un flujo laminar y estacionario el caudal depende de la superficie, *S*, y de la velocidad del fluido, *v* (en el punto donde se encuentra S), según la expresión:

$$C = S \cdot v$$

4. Ecuación de continuidad.

- En el caso de un fluido incompresible (líquido) que circula en régimen laminar y estacionario, el caudal es el mismo en todos los puntos del fluido:



$$S_1 \cdot v_1 = S_2 \cdot v_2 = \ldots \text{(ecuación de continuidad)}$$

5. *Teorema de Bernoulli. Interpretación energética.*

- El teorema de Bernoulli

$$P_1 + \rho g y_1 + \frac{1}{2}\rho v_1^2 = P_2 + \rho g y_2 + \frac{1}{2}\rho v_2^2$$

  se aplica a un fluido ideal que circula en régimen estacionario y laminar. La expresión es valida para cualquier par de puntos (1) y (2) situados sobre una misma línea de corriente.

- El teorema es una consecuencia del principio de conservación de la energía mecánica.

6. *Aplicaciones del teorema de Bernoulli.*

- Para flujos horizontales ($y_1 = y_2$) se llega al importante resultado de que la presión disminuye cuando aumenta la velocidad del fluido. Este resultado se conoce con el nombre de "efecto" Venturi.

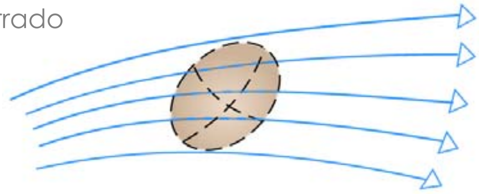
FísicaTema7

Dinámica de los Fluidos ideales

4. Ecuación de continuidad

Principio de Conservación de la Masa

Φ: elemento de volumen
o recinto cerrado



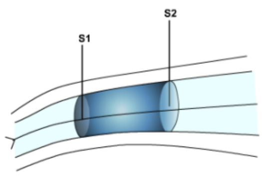
Δt : Intervalo de tiempo

$$M_{\text{entra en } \Phi} - M_{\text{sale de } \Phi} = \Delta M_{\text{en } \Phi}$$

4. Ecuación de continuidad

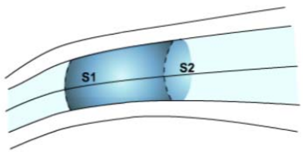
Flujo estacionario y laminar

Flujo Estacionario ⇨ $\Delta M = 0$
Flujo Laminar ⇨ Φ = Tubo de corriente



Las paredes del tubo son tangentes a las líneas de corriente ↔ el fluido solamente entra en Φ a través de S_1 y solamente sale a través de S_2

4. Ecuación de continuidad



$$M_{\text{entra en }\Phi} = V_{\text{entra en }\Phi} \cdot \rho_1 = S_1 \cdot v_1 \cdot \Delta t \cdot \rho_1$$

$$M_{\text{sale de }\Phi} = V_{\text{sale de }\Phi} \cdot \rho_2 = S_2 \cdot v_2 \cdot \Delta t \cdot \rho_2$$

$$\Delta M = 0 \Leftrightarrow S_1 \cdot v_1 \cdot \Delta t \cdot \rho_1 = S_2 \cdot v_2 \cdot \Delta t \cdot \rho_2$$

4. Ecuación de continuidad

- Fluido compresible (gases)

$S_1 \cdot v_1 \cdot \rho_1 = S_2 \cdot v_2 \cdot \rho_2 \Longrightarrow$ Ecuación de Continuidad

- Fluido incompresible (líquidos)

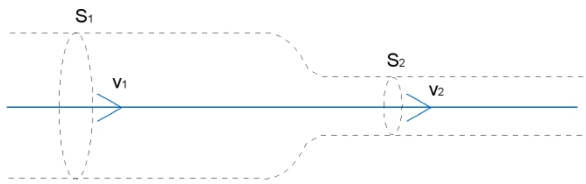
$\rho_1 = \rho_2$

$S_1 \cdot v_1 \cdot \cancel{\rho_1} = S_2 \cdot v_2 \cdot \cancel{\rho_2}$

$S_1 \cdot v_1 = S_2 \cdot v_2 \Longrightarrow$ Ecuación de Continuidad

4. Ecuación de continuidad

Cañería que se estrecha

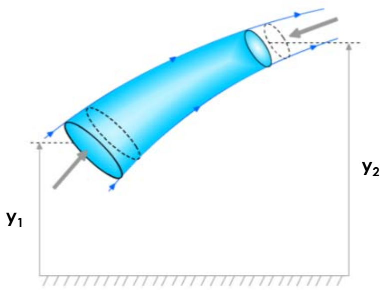


$S_1 \cdot v_1 = S_2 \cdot v_2$

$S_1 > S_2 \leftrightarrow v_1 < v_2 \Longrightarrow$ Para los fluidos incompresibles la velocidad aumenta cuando la canalización se estrecha.

5. Teorema de Bernoulli. Interpretación Energética

Fluido incompresible en movimiento estacionario y laminar.



5. Teorema de Bernoulli. Interpretación Energética

Aplicación del principio de conservación de la energía a una masa de fluido ascendente

Situación Inicial Comprendida entre 1 y 2	Δt ⇒	**Situación Final** Comprendida entre 1' y 2'

5. Teorema de Bernoulli. Interpretación Energética

- Conservación de la energía

$E_{1,2} + W^{no\ cons} = E_{1',2'} \leftrightarrow W^{no\ cons} = \Delta\ \varepsilon_C + \Delta U^g$

- $W^{no\ cons}$!Las fuerzas debidas a la presión del fluido son no conservativas!

$P_1 \Rightarrow F_1 = P_1 \cdot S_1$ (Empuja el fluido en un movimiento ascendente).
$P_2 \Rightarrow F_2 = P_2 \cdot S_2$ (Opuesta al movimiento ascendente).

$W^{no\ cons} = F_1 \cdot \Delta x_1 \cdot \cos 0° + F_2 \cdot \Delta x_2 \cdot \cos 180° = P_1 \cdot S_1 \cdot \Delta x_1 - P_2 \cdot S_2 \cdot \Delta x_2$

$S_1 \cdot \Delta x_1 = S_2 \cdot \Delta x_2 = \Delta V$ (fluido Incompresible, flujo estacionario)

$W^{no\ cons} = (P_1 - P_2)\ \Delta V$

5. Teorema de Bernoulli. Interpretación Energética

- $\Delta\ \varepsilon_C = (\varepsilon_C)_{1',2'} - (\varepsilon_C)_{1,2} = [(\varepsilon_C)_{1',2} + (\varepsilon_C)_{2,2'}] - [(\varepsilon_C)_{1,1'} + (\varepsilon_C)_{1',2}] =$
$= (\varepsilon_C)_{2,2'} - (\varepsilon_C)_{1,1'}$

Si $\boxed{\begin{matrix} S_1, \Delta x_1 \\ S_2, \Delta x_2 \end{matrix}}$ suficientemente pequeños, entonces $\boxed{\begin{matrix} v_1 \\ v_2 \end{matrix}}$

$$\Delta\ \varepsilon_C = \frac{1}{2} m_{2,2'}\ v_2^2 - \frac{1}{2}\ m_{1,1'}\ v_1^2$$

$m_{2,2'} = m_{1,1'} = \Delta m$ (flujo estacionario)

$$\Delta\ \varepsilon_C = \frac{1}{2} \Delta\ m\ (v_2^2 - v_1^2)$$

- $\Delta\ U^g = (U^g)_{1',2'} - (U^g)_{1,2} = mg\ (y_2 - y_1)$

Argumentación idéntica a la utilizada para la energía cinética.

5. Teorema de Bernoulli. Interpretación Energética

Conclusión:

$$(P_1 - P_2)\,\Delta V = \frac{1}{2}\Delta m\,(v_2^2 - v_1^2) + \Delta m \cdot g\,(y_2 - y_1)$$

$$\Delta m = \rho\,\Delta V$$

$$(P_1 - P_2)\,\Delta V = \frac{1}{2}\rho\,\Delta V\,(v_2^2 - v_1^2) + \rho\,\Delta V \cdot g\,(y_2 - y_1)$$

$$P_1 + \frac{1}{2}\rho \cdot v_1^2 + \rho \cdot g \cdot y_1 = P_2 + \frac{1}{2}\rho\,v_2^2 + \rho \cdot g \cdot y_2$$

Tema 8: DINÀMICA DE LOS FLUIDOS VISCOSOS.

1. Movimiento de los fluidos reales. Viscosidad

- El módulo de la fuerza viscosa por unidad de superficie que se observa entre dos capas de fluido adyacentes que se mueven con velocidades distintas, viene dada por:

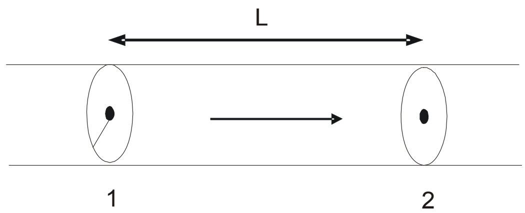
$$\frac{|F_{visc}|}{S} = \eta \frac{|\Delta v|}{\Delta y}$$

donde *η* es el coeficiente de viscosidad del fluido; *Δv* es la diferencia entre las velocidades; y *Δy* el espesor de las capas.

- Las unidades de *η* en el SI son los (Pa·s).

2. Flujo laminar de un fluido viscoso por un tubo

- En el caso de un fluido real o viscoso que circula por un tubo cilíndrico horizontal, la presión va disminuyendo progresivamente, de acuerdo con la ley de Hagen-Poiseuille, cuando el flujo es laminar y estacionario.



$$P_1 - P_2 = \frac{8\eta LC}{\pi R^4} > 0$$

donde "η" es la viscosidad, "L" la longitud del tramo del tubo considerado, "R" el radio del tubo y "C" el caudal.

3. Ley de Stokes. Sedimentación

- Un objeto que se mueve en el seno de un fluido viscoso con velocidad, *v*, relativamente pequeña, experimenta una fuerza contraria al movimiento, o *fuerza de resistencia*, debida a la viscosidad del fluido. Cuando el objeto es un sólido de forma esférica, el valor de esta fuerza es:

$$F_r = 6\pi\, rv\eta$$

donde *r* es el radio de la esfera y η el coeficiente de viscosidad del fluido. Esta fórmula es la *ley de Stokes*.

FísicaTema8

Dinámica de los Fluidos Viscosos

ÒpticaiOptometria

1. Movimiento de fluidos reales. Viscosidad.
2. Flujo laminar y estacionario de un fluido viscoso por un tubo: Ley de Hagen-Poiseuille
3. Ley de Stokes. Sedimentación

1. Movimiento de fluidos reales. Viscosidad.

- Para estudiar el movimiento de los fluidos reales, se deben tener en cuenta las fuerzas viscosas.

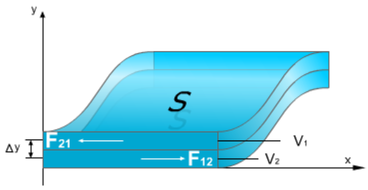
- Las fuerzas viscosas se ponen de manifiesto entre porciones de fluido en contacto que se mueven a velocidades diferentes. Se trata de fuerzas disipativas similares al rozamiento.

- En este tema estudiaremos el comportamiento de los fluidos teniendo en cuenta las fuerzas viscosas, en el caso de flujos laminares y estacionarios.

1. Movimiento de fluidos reales. Viscosidad.

- Considerामos dos capas de fluido adyacentes

$$\left|\vec{F}_{12}\right| = \left|\vec{F}_{21}\right| = F_{visc}$$



- Se comprueba experitalmente que: $\dfrac{F_{visc}}{S} = \eta \left|\dfrac{\Delta v}{\Delta y}\right|$

- η: Coeficiente de viscosidad (o viscosidad) para cada fluido
  $\eta = \eta(T)$

- Unidades de η

SI	$Pa \cdot s$
Scgs	Po (Poise)

$1\ Pa \cdot s = 10\ Po$

2. Flujo laminar y estacionario de un fluido viscoso por un tubo: Ley de Hagen-Poiseuille

- Tubo horizontal cilíndrico (cañerías y conducciones urbanas, arterias y venas humanas)
- Flujo laminar y estacionario

❖ para describir la posición de cada capa utilizaremos la coordenada radial: r
❖ La coordenada ℓ es paralela al tubo
❖ La pared del tubo está situada en r=R, siendo R el radio del tubo. El eje del tubo está situado en r = 0.

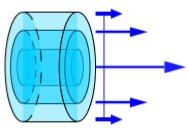
- La ecuación de Bernouilli **no** es valida para fluidos reales o viscosos

FísicaTema8

2. Flujo laminar y estacionario de un fluido viscoso por un tubo: Ley de Hagen-Poiseuille

- Se comprueba experimentalmente que en el caso planteado la velocidad de fluido es máxima sobre el eje del tubo (r=0) y nula para la capa en contacto con la pared del tubo.
- La expresión matemática correspondiente a v(r), la velocidad de cada capa de fluido es:

$$v(r) = \frac{(P_1 - P_2)}{4\ell\eta}\underbrace{(R^2 - r^2)}_{\boxed{\text{Perfil parabólico}}} \qquad \begin{cases} r = 0 \rightarrow v_{máxima} \\ r = R \rightarrow v = 0 \end{cases}$$



2. Flujo laminar y estacionario de un fluido viscoso por un tubo: Ley de Hagen-Poiseuille

- La expresión de la velocidad se deduce igualando las fuerzas que actúan sobre cada capa de fluido.

$(P_1\text{-}P_2) \rightarrow$ fuerza a favor del movimiento

$\eta \rightarrow$ fuerza de viscosidad contraria al movimiento

- A partir de la expresión de la velocidad se deduce la expresión del caudal.

$$\boxed{C=\int_S v\,ds=\frac{(P_1-P_2)\cdot\pi R^4}{8\ell\eta}} \Longrightarrow \text{Ley de Hagen-Pouiseuille}$$

2. Flujo laminar y estacionario de un fluido viscoso por un tubo: Ley de Hagen-Poiseuille

- Despejando $(P_1\text{-}P_2)$ de la expresión del caudal se obtiene

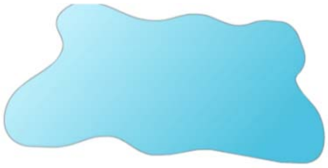
$$(P_1-P_2)=\frac{8\ell\eta C}{\pi R^4}>0 \Rightarrow \boxed{P_1>P_2}$$

Pérdida de carga

- Flujo laminar y estacionario de un fluido IDEAL por un tubo horizontal cilíndrico.
  - Teorema de Bernouilli $\Longrightarrow$ $P_1 = P_2$

3. Ley de Stokes. Sedimentación

- Objeto que se mueve a velocidad $\vec{v}$ en el seno de un fluido real o viscoso



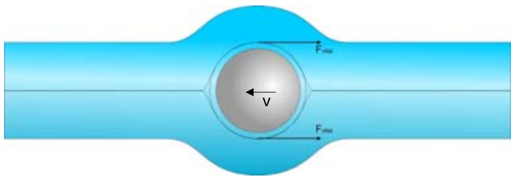
F (contraria al movimiento)

- En este apartado se describe el origen de esta fuerza en el caso de objetos que se muevan con velocidades relativamente pequeñas (flujo laminar)

3. Ley de Stokes. Sedimentación

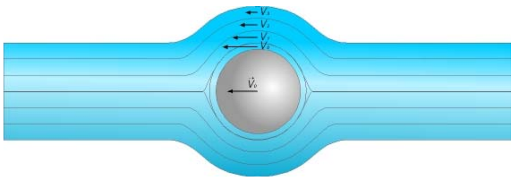
- Objeto esférico-sólido

El objeto avanza con una capa de fluido unida a él.



Ley de Stokes $\rightarrow \sum F_{visc} = F_{stokes} = 6\pi\eta r v$

- η : Viscosidad fluido
- r : Radio objeto
- v : Velocidad objeto



3. Ley de Stokes. Sedimentación

- Objeto = Esfera gaseosa

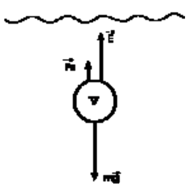
  $F_{stokes} = 4\pi\ \eta\ r\ v$

- Objeto cualquiera

  $F_{stokes} = B\ \eta\ r\ v$ $\begin{cases} \text{B: Coeficiente de forma} \\ \text{r: Dimensión transversal del objeto} \end{cases}$

3. Ley de Stokes. Sedimentación

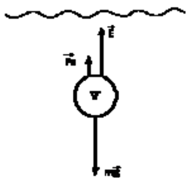
- Aplicación de la ley de Stokes al caso de sedimentación (Movimiento de objetos en un fluido bajo la acción del peso)



$$\begin{cases} mg = \left(\frac{4}{3}\pi r^3\right)\cdot \rho_{obj}\cdot g \rightarrow \text{constante} \\ E = \left(\frac{4}{3}\pi r^3\right)\cdot \rho_{fl}\cdot g \rightarrow \text{constante} \\ F_s = 6\eta\pi r v \rightarrow \text{depende de v} \end{cases}$$

3. Ley de Stokes. Sedimentación

- Instante inicial: ***t=0*** $\rightarrow$ v = v_0 = 0



$$\rho_{obj} > \rho_{f\ell} \Rightarrow mg > E \Rightarrow \left(m\vec{g} + \vec{E}\right) = \begin{cases} \neq 0 \\ \text{Vertical} \\ \text{Hacia abajo} \end{cases}$$

$$\Rightarrow \vec{a} \begin{cases} \neq 0 \\ \text{Vertical} \\ \text{Hacia abajo} \end{cases}$$

aceleración de cuerpo

FísicaTema8

3. Ley de Stokes. Sedimentación

- Instante $t_1 > 0$

$$\vec{V} = \begin{cases} \text{módulo creciente} \\ \text{vertical} \\ \text{hacia abajo} \end{cases} \qquad \vec{F}_s = \begin{cases} \neq 0 \\ \text{vertical} \\ \text{hacia arriba} \end{cases}$$

$$\sum \vec{F} = m\vec{g} + \vec{E} + \vec{F}_s = \begin{cases} (mg - E - F_s)\text{: módulo decreciente} \\ \text{vertical} \\ \text{hacia abajo} \end{cases}$$

3. Ley de Stokes. Sedimentación

(*el módulo de la resultante de las fuerzas va decreciendo hasta que en un determinado*)

- instante $t_2 > t_1$

$$\sum \vec{F} = 0 \Leftrightarrow$$

$\Leftrightarrow \boxed{(mg - E - F_s) = a = 0 \quad (1)} \Leftrightarrow$ v = constante a partir de este instante

entonces la velocidad recibe el nombre de velocidad limite, de sedimentación o de régimen $\rightarrow v = v_\ell$

3. Ley de Stokes. Sedimentación

Conociendo las características del objeto y del fluido la expresión (1) permite calcular la velocidad límite

$$v_\ell = \frac{mg - E}{6\pi r \eta} = \frac{\left(\frac{4}{3}\pi r^3\right)\left(\rho_{obj} - \rho_{\rho\ell}\right)g}{6\pi r \eta} = \frac{2r^2}{9\eta}\left(\rho_{obj} - \rho_{f\ell}\right)g$$

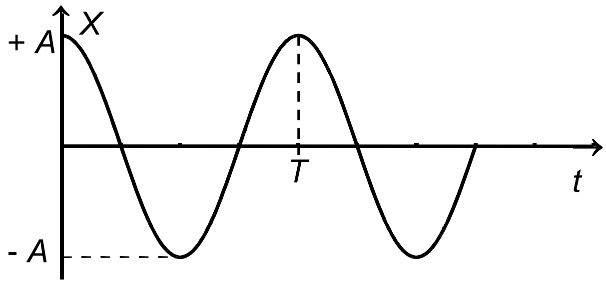
- EJEMPLOS
  - ❖Sedimentación de fangos en las plantas depuradoras
  - ❖Plancton marino
  - ❖**Ascenso** de burbujas en las bebidas gaseosas

<u>**Tema 10: OSCILACIONES**</u>

1. Movimiento harmónico simple. Ecuaciones de movimiento

- La posición x de una partícula en movimiento armónico simple, *mas*, viene dada por:

$$x = A\cos(\omega t + \delta)$$



donde A es la amplitud, ω la frecuencia angular y δ es la fase inicial. El movimiento físico de la partícula descrito por esta ecuación es una oscilación simétrica respecto al punto $x = 0$. La representación grafica de la oscilación permite visualizar el tiempo necesario para una oscilación completa, denominado período (T).

- La velocidad y la aceleración de la partícula que oscila con un *mas* vienen dadas, respectivamente, por:

$$v = -A\omega\sin(\omega t + \delta) \qquad a = -A\omega^2\cos(\omega t + \delta) = -\omega^2 x$$

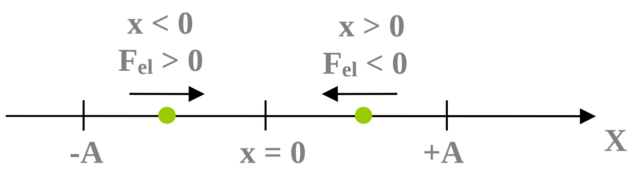
La aceleración es proporcional a la posición, x, con signo contrario.

- La frecuencia ν de un *mas* se define como el número de oscilaciones por segundo hechas por la partícula. Por lo tanto, es la inversa del período. Ambas magnitudes dependen de la frecuencia angular según las expresiones.

$$T = \frac{2\pi}{\omega} \qquad \nu = \frac{\omega}{2\pi}$$

2. Movimiento de una masa unida a un muelle. Energía potencial elástica

- El movimiento de oscilación de una masa unida a un muelle es un ejemplo de *mas*. La fuerza que ejerce el muelle sobre la masa es proporcional a la deformación del muelle o, lo que es equivalente, al desplazamiento del cuerpo respecto a la posición de equilibrio, x. Si F_{el} es la única fuerza que actúa sobre la masa, entonces la aceleración de la misma resulta también proporcional a la posición.



$$F_{el} = -kx \qquad a = \frac{F_{el}}{m} = -\frac{k}{m}x$$

La constante de proporcionalidad, k, es la constante elástica del muelle.

- En este caso la frecuencia angular, ω, y el periodo T resultan:

$$\omega = \sqrt{\frac{k}{m}} \qquad T = 2\pi\sqrt{\frac{m}{k}}$$

- La energía potencial de una masa que oscila unida a un muelle de constante elástica *k* es:

$$U^{el} = \frac{1}{2}kx^2$$

  donde *x* es el desplazamiento del cuerpo respecto a la posición de equilibrio, que se toma como punto de referencia.

- La energía mecánica del movimiento harmónico simple es proporcional al cuadrado de la amplitud. En el caso de una masa que oscila unida a un muelle, de constante elástica *k*, es:

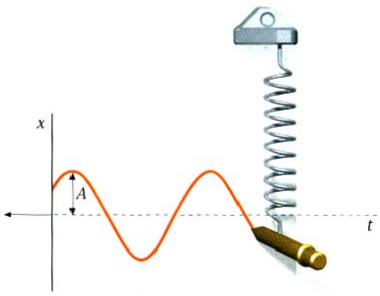
$$E = \varepsilon_c + U^{el} = \frac{1}{2}kA^2$$

3. Oscilaciones amortiguadas

- En las oscilaciones de los sistemas reales, el movimiento es amortiguado debido a las fuerzas de fricción, o a otras fuerzas que disipan la energía. Si el amortiguamiento es más grande que cierto valor crítico, el sistema no oscila sino que retorna simplemente a su posición de equilibrio cuando es perturbado.

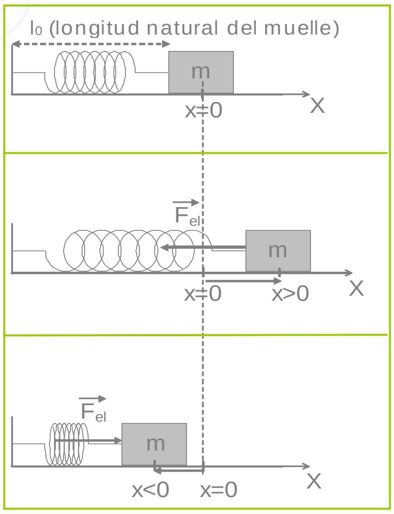
1. Movimiento armónico simple. Ecuaciones de movimiento.

Movimiento armónico simple. Ecuaciones de movimiento



$$x(t) = A \cos(wt + \delta)$$

2. Oscilación de una masa unida a un muelle. Energía potencial elástica.



$$\boxed{\vec{F}_{el} = -k \cdot \vec{x}}$$ LEY DE HOOKE

k: constante elàstica del muelle

Tema 11: DESCRIPCIÓN DEL MOVIMIENTO ONDULATORIO EN UNA DIMENSIÓN

1. Introducción

- Una onda es una "perturbación" que se propaga en un medio. El término "perturbación" significa "cambio" de una magnitud física. En el caso de las ondas en una cuerda, la perturbación es un desplazamiento vertical de las partículas de la cuerda.

- En las ondas transversales, como las ondas en una cuerda, la perturbación es perpendicular a la dirección de la propagación. En las ondas longitudinales, como las ondas sonoras, la perturbación es paralela a la dirección de propagación.

- La propagación implica transporte de energía y de cuantidad de movimiento.

2. Función de onda

- Cualquier perturbación que se propague en un medio unidimensional (que se hace coincidir con el eje *X*) se describe matemáticamente mediante funciones de tipo:

$$f(x,t)=f(x-vt) \quad [1] \qquad \text{o bien} \qquad f(x,t)=f(x+vt) \quad [2]$$

Donde *x* localiza los puntos del medio, *t* es el tiempo, y *v* es la velocidad de propagación, o velocidad a la que se desplaza la perturbación en el medio. La función [1] corresponde a una perturbación que se propaga en el sentido creciente del eje *X* y la función [2] a una que se propaga en sentido contrario.

3. Velocidad de propagación de un pulso en una cuerda

- La velocidad de una onda depende de las propiedades elásticas del medio, y es independiente del movimiento de la fuente que produce las ondas. En el caso de una cuerda, la velocidad de las ondas depende de la tensión de la cuerda y de su masa por unidad de longitud, μ, mediante la expresión:

$$v=\sqrt{\frac{Tensión}{\mu}}$$

4. Reflexión y transmisión de pulso

- Si una perturbación llega a un punto donde hay un cambio de medio entonces, en parte se refleja, volviendo por el medio donde venia, y en parte se transmite hacia al segundo medio.

5. Ondas harmónicas en una dimensión

- En el caso de las *ondas harmónicas*, la perturbación varía sinusoidalmente con el tiempo y el espacio. La función de onda es:

$$y\ (x,y) = y_0 \sin\left[k\left(x - vt\right) + \delta\right] = y_0 \sin\left(kx - wt + \delta\right)$$

donde y_0 es la amplitud de la onda, k es una constante llamada número de onda, $w = k\cdot v$ es la frecuencia angular, y δ es la fase inicial de la onda.

6. Parámetros que caracterizan una onda harmónica

- La longitud de onda, *λ,* es la distancia mínima entre dos puntos del medio por los cuales el valor de la función de onda es el mismo en todo instante de tiempo. Coincide con la distancia entre "crestas" sucesivas de la onda.

- El período, *T*, de la onda es el tiempo que tarda la función de onda en un punto, en repetir-se a si misma. Coincide con el período del movimiento harmónico que genera la onda.

- La frecuencia, ν, de la onda es el número de veces por segundo que la función de onda de un punto se repite a si misma ($\nu = 1/T$).

- Las constantes k y ω están relacionadas con la longitud de onda i el período mediante las expresiones

$$k = \frac{2\pi}{\lambda} \qquad \omega = \frac{2\pi}{T} = 2\,\pi\,\nu$$

- La velocidad de una onda harmónica está relacionada con las constantes descritas ene este apartado de acuerdo con:

$$v = \nu\lambda = \frac{\lambda}{T} = \frac{\omega}{k}$$

7. Energía de una onda harmónica

- La energía transmitida por una onda harmónica es proporcional al cuadrado de la amplitud de la onda $E \propto (y_0)^2$.

8. Ecuación de onda

- Cualquier función que describe correctamente una perturbación que se propaga sigue la ecuación de onda, que relaciona las derivadas espaciales de la función de onda con las derivadas temporales:

$$\frac{\partial^2 f}{\partial^2} = \frac{1}{v^2} = \frac{\partial^2 f}{\partial t^2}$$

9. Ondas sonoras

- Una onda sonora es una vibración de partículas de aire que se propagan por colisión. Las ondas sonoras son *longitudinales*.

- Las ondas sonoras se generan mediante la vibración de un objeto material (diapasón, cuerdas vocales, membrana de un alta voz...) que provoca la vibración de partículas de aire.

- La descripción matemática de una onda sonora unidimensional que se propaga de izquierda a derecha en la dirección horizontal, paralela al eje *x* es:

$$s(x,t) = s_0 \sin(kx - \omega t)$$

  donde
  - s es el desplazamiento horizontal de una partícula de aire respecto a su posición de equilibrio.
  - x es la posición de equilibrio de cada partícula.
  - s_0 es la amplitud de la oscilación y el resto de parámetros son comunes a les ondas ya estudiadas.

- La velocidad de propagación del sonido en el aire (T = 20ºC) es v = 340 m/s.

FísicaTema11

Descripción del movimiento ondulatorio en una dimensión

ÒpticaiOptometria

FísicaTema11

0. Introducción: Ondas mecánicas.
1. Pulso de onda. Pulso longitudinal y transversal.
2. Función de onda.
3. Velocidad de propagación de un pulso en una cuerda.
4. Reflexión y transmisión de pulsos.
5. Ondas armónicas en una dimensión.
6. Parámetros que caracterizan una onda armónica.
7. Energía e intensidad de una onda armónica.
8. La ecuación de onda.
9. Ondas sonoras.

ÓpticaiOptometría

0. Introducción: ondas mecánicas.

- Onda: Perturbación que se propaga
- Ondas mecánicas.
  - -Perturbación: movimiento de partículas materiales.
  - -Propagación: debida a la interacción entre las partículas del medio.
  - -“Fenómenos ondulatorios” + descripción “matemática”.

Común para cualquier tipo de onda

  - -Ondas mecánicas 1D: caso más sencillo.

FísicaTema11

0. Introducción: ondas mecánicas.

Fuente	Medio	Receptor
Punto donde se **genera** la perturbación mediante una **fuerza externa**	**propagación**	Se pone en movimiento (se perturba) debido a la propagación. Cualquier punto del medio es “receptor”.

Figura extraída de *Paul G. Hewitt. Física conceptual, novena edición. PEARSON EDUCACIÓN,* Mexico, 2004

1. Pulso de onda. Pulso longitudinal y transversal.

• "Sacudida" vertical en el extremo de una cuerda tensa horizontal → la forma de la cuerda varia con el tiempo tal y como indica la animación.

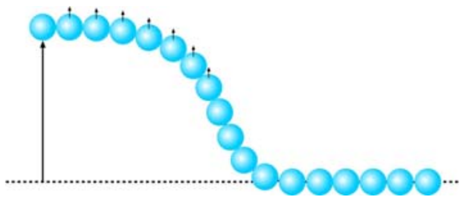
La deformación producida recorre la cuerda

perturbación | propagación | medio

• Caso estudiado → Pulso

1. Pulso de onda. Pulso longitudinal y transversal.

• La propagación es posible gracias a las fuerzas "elásticas" de interacción (enlace) entre las "partículas" de la cuerda.



• La propagación del pulso:

-No implica transporte de materia

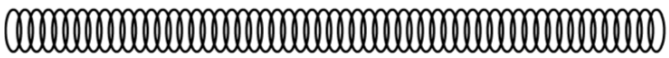
-Movimiento vertical de las partículas de la cuerda → ENERGÍA y CANTIDAD DE MOVIMIENTO que se transmite "de cada partícula a la siguiente".

1. Pulso de onda. Pulso longitudinal y transversal.

• Onda (pulso) transversal

Dirección de la perturbación (vertical) $\perp$ Dirección de propagación (horizontal)

• Onda (pulso) longitudinal



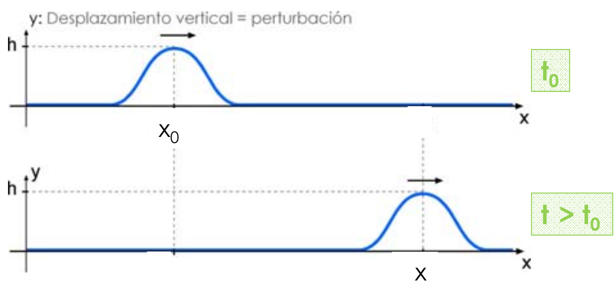
Dirección de la perturbación (horizontal) // Dirección de propagación (horizontal)

2. Función de onda.

• Medio ↔ coordenada x

• Perturbación = desplazamiento vertical ↔ coordenada y

  • $y = f(x,t)$: el desplazamiento vertical de las partículas es diferente en cada **punto** de la cuerda i en cada instante de **tiempo**.



$$v = \frac{x - x_0}{t - t_0} \quad (m/s)$$

• Velocidad de propagación ↔ sentido positivo eje X.

2. Función de onda.

- Descripción de la propagación: lo que se observa en (x,t) es **lo mismo** que se observaba en (x_0, t_0).

$$f(x,t) = f(x_0,t_0) = f((x-vt),0) \equiv f(x-vt)$$

$x_0 = x - vt$

$t_0 = 0$

La relación entre **x** y ***t*** no puede ser cualquiera. Depende de la **velocidad de propagación.**

2. Función de onda.

- En general, cualquier función del tipo:

$$f(x,t) = f(x\text{-}vt)$$

describe una perturbación que se propaga

→ En el ejemplo del pulso longitudinal en un muelle, la perturbación que se propaga es una compresión de las anillas, ΔP.

$$\Delta P(x,t) = \Delta P(x\text{-}vt)$$

- Si la perturbación se propaga en el sentido negativo del eje X (de derecha a izquierda)

$$f(x,t) = f(x+vt)$$

3. Velocidad de propagación de un pulso en una cuerda.

- Para cualquier onda, la velocidad de propagación depende exclusivamente de las propiedades del medio en que se propaga.
- En el caso de un pulso (o cualquier perturbación transversal) en una cuerda:

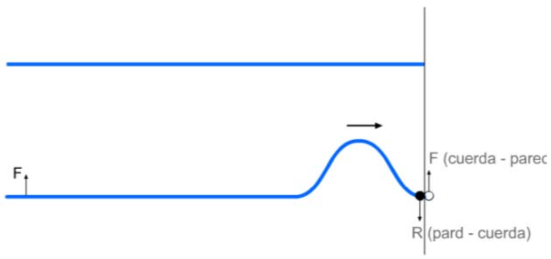
  - ***Tensión***
  - μ (Kg/m): Densidad lineal

$$v = \sqrt{\frac{Tensión}{\mu}}$$

4. Reflexión y Transmisión de pulsos.

- Para cualquier onda, cuando hay un cambio de medio se producen los fenómenos de REFLEXIÓN y TRANSMISIÓN

Ejemplo1: Reflexión de un pulso en una cuerda fijada por un extremo



La pared "absorbe" la perturbación

4. Reflexión y Transmisión de pulsos.

Ejemplo2: Reflexión y transmisión de un pulso en el punto de unión entre dos cuerdas de distinta densidad lineal.

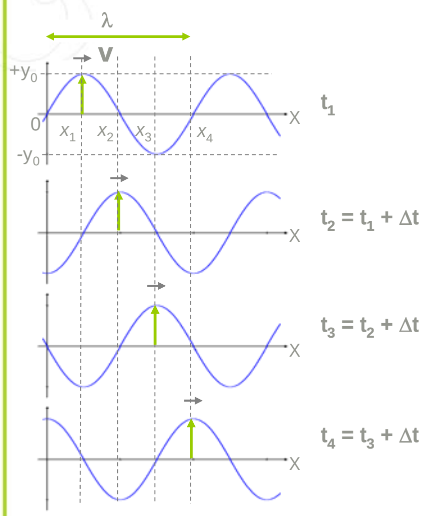
5. Ondas armónicas en una dimensión.

• En el caso de una cuerda tensa infinitamente larga, si se impone un ***mas*** sobre uno de sus extremos, la cuerda "se ondula" y las ondulaciones "recorren" la cuerda (se propagan) como pasaba en el caso del pulso.

•La perturbación que se propaga es un movimiento vertical de las partículas, un ***mas***, desde $+y_0$ a $-y_0$.

•Cualquier onda puede describirse como una suma de ondas armónicas.

5. Ondas armónicas en una dimensión.



- Propagación: la "cresta" de la onda se sitúa sobre todos los puntos de cuerda sucesivamente.

velocidad de propagación

$$v = \frac{x_2 - x_1}{t_2 - t_1} = \frac{x_3 - x_2}{t_3 - t_2}$$

- ***mas*** ($+y_0$, $-y_0$) de cada uno de los puntos de la cuerda.

5. Ondas armónicas en una dimensión.

DESCRIPCIÓN MATEMÁTICA DE UNA ONDA ARMÓNICA

$t_1 = 0$

$y\,(x,0) = y_0 \sin\,(kx + \delta)$

CONSTANTES

- y_0 : amplitud del mas (m)
- k: número de onda (m^{-1})
- δ: fase inicial (rad)

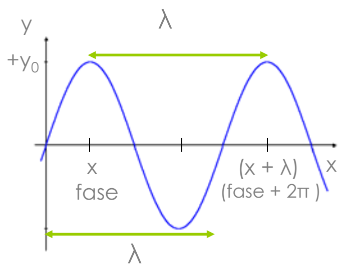
➢ Tiempo *t* genérico posterior al inicial

$$y(x,t) = y((x - vt),0) = y_0 \sin(k(x - vt) + \delta) \quad \textit{propagación}$$

$$y(x,t) = y((x + vt),0) = y_0 \sin(k(x + vt) + \delta) \quad \textit{propagación}$$

6. Parámetros que caracterizan una onda armónica.

- Amplitud: y_0 (m) (caso de la cuerda)
- Fase: $(k(x - vt) + \delta)$ (rad) → información sobre la propagación.
- Fase inicial: δ (rad) → fase en x = 0 y t = 0 → $f(0,0) = y_0 \sin\delta$
- Número de onda: k (m^{-1}) = $\frac{d(fase)}{dx}$
- Longitud de onda: λ (m) → **Distancia** mínima entre dos puntos del medio (cuerda) para los que la **función de onda tiene el mismo valor** en todo instante de tiempo.

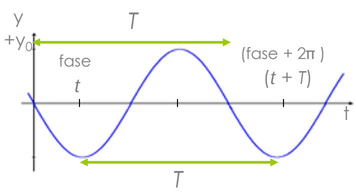


$$k(x + \lambda - vt) = k(x - vt) + 2\pi$$

$$\lambda = \frac{2\pi}{k}$$

6. Parámetros que caracterizan una onda armónica.

- Frecuencia angular: ω (rad/s) = $\frac{-d(fase)}{dt}$ = kv
- Periodo: T(s) → **Tiempo** que tarda la función de onda en un punto **en repetirse a si misma**. Coincide con el periodo del "mas" que se propaga.



$$k(x - v(t + T)) = k(x - vt) + 2\pi$$

$$T = \frac{2\pi}{kv} = \frac{2\pi}{\omega}$$

- Frecuencia: ν (Hz) → **Número de veces por segundo**, que la función de onda en un punto se repite a si misma. Coincide con la frecuencia del "mas" que se propaga.

$$\nu = \frac{1}{T} = \frac{\omega}{2\pi}$$

6. Parámetros que caracterizan una onda armónica.

Relaciones útiles entre los parámetros descritos:

$$\underbrace{w}_{\text{frecuencia angular}} = 2\pi \overbrace{\nu}^{\text{frecuencia}} = \frac{2\pi}{\underbrace{T}_{\text{periodo}}}$$

$$\overbrace{v}^{\text{velocidad de propagación}} = \frac{w}{\underbrace{k}_{\text{número de onda}}} = \frac{\overbrace{\lambda}^{\text{longitud de onda}}}{T} = \lambda \cdot \nu$$

6. Parámetros que caracterizan una onda armónica.

- Expresión más frecuente de la función correspondiente a una onda armónica:

$$y(x,t) = y_0 \sin(kx - wt + \delta) = y_0 \sin\left[2\pi\left(\frac{x}{\lambda} - \frac{t}{T}\right) + \delta\right]$$

$$y(x,t) = y_0 \sin(kx + wt + \delta) = y_0 \sin\left[2\pi\left(\frac{x}{\lambda} + \frac{t}{T}\right) + \delta\right]$$

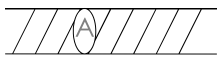
7. Energía e intensidad de una onda armónica.

•Onda → Transporte de energía: se describe mediante la **intensidad** (irradiancia), I.

Energía transmitida por unidad de tiempo

$$\boxed{I = \frac{\Delta E / \Delta t}{A} \left(\frac{W}{m^2} \right)}$$

Área



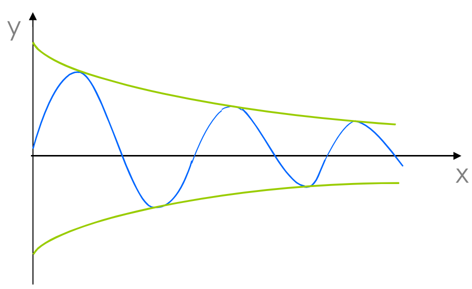
{ Constante en el caso de medios 1D (cuerda)

mas $\boxed{\Delta E, I \propto y_0^{\,2}}$ (muelle ↔ fuerzas de enlace)

7. Energía e intensidad de una onda armónica.

ABSORCIÓN

Si el medio por donde se propaga la onda no es perfectamente elástico, la energía asociada a la perturbación disminuye a medida que la perturbación avanza en el medio → la amplitud de la onda disminuye.



La energía de la onda es absorbida por el medio

8. La ecuación de onda.

- Cualquier función.

    f(x - vt) , f(x+vt) , combinación lineal de ellas.

  Satisface la siguiente ecuación diferencial.

$$\frac{\partial^2 f}{\partial x^2} = \frac{1}{v^2}\frac{\partial^2 f}{\partial t^2}$$

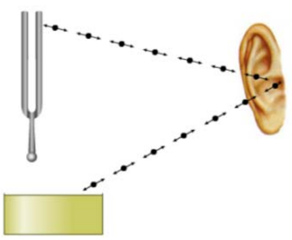
- La función ***f*** describe una perturbación que se propaga y ***v*** es la velocidad de propagación.

9. Ondas sonoras.

- Onda sonora: vibración de partículas de aire que se propaga por colisión.

Vibración de partículas → Variaciones en la presión y la densidad del aire → Ondas de presión

- Fuente: Vibración de un objeto material (diapasón, cuerdas bucales, cuerda de instrumento, membrana altavoz…)

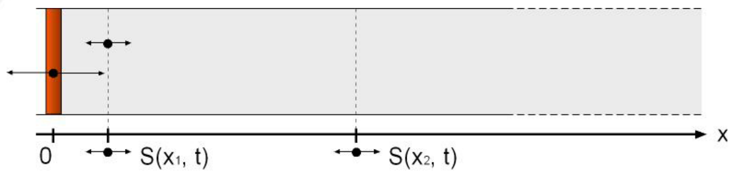


→ Oscilación membrana tímpano → audición

ONDA LONGITUDINAL

9. Ondas sonoras.

- Descripción matemática – caso 1D



Desplazamiento horizontal respecto a la posición de equilibrio

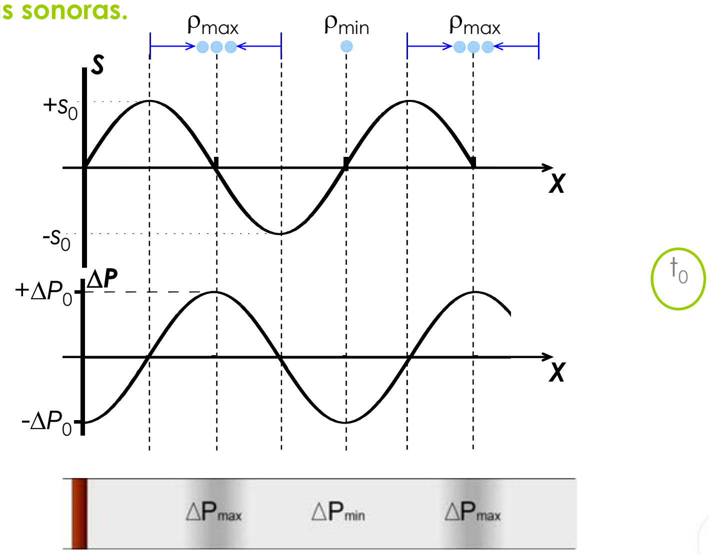
Amplitud de oscilación

$$s(x,t)=s_0\sin(kx-wt+\delta)$$

Posición de equilibrio

Posible fase inicial

9. Ondas sonoras.



9. Ondas sonoras.

- Velocidad de propagación del sonido.

$$v = \sqrt{\frac{\chi}{\rho}} = \sqrt{\frac{\gamma RT}{M}}$$

$\boxed{\text{Gas ideal}}$

20 °C ⟶ **v**= 340 m/s

0 °C ⟶ **v**= 331 m/s

Tema 12: SUPERPOSICIÓN DE ONDAS 1D

1. Interferencia. Superposición

- Cuando dos o mas ondas se encuentran en un punto decimos que se produce una *interferencia* entre ellas.

- PRINCIPIO DE SUPERPOSICIÓN: Cuando dos o mas ondas interfieren en un punto, la perturbación resultante es la suma de las perturbaciones que produciría cada onda de forma separada en este punto. Por lo tanto, la función de onda resultante se obtiene sumando las funciones de las ondas que interfieren.

$$f_R = f_1 + f_2 + \dots$$

2. Superposición de dos ondas harmónicas

- Cuando interfieren dos ondas harmónicas, y_1 i y_2

  $$y_1 = y_0 \sin(kx - \omega t) \qquad y_2 = y_0 \sin(kx - \omega t + \delta)$$

  que se propagan en el mismo sentido, con las mismas amplitud, frecuencia y longitud de onda, y una diferencia de fase δ, la función de onda resultante es:

  $$y_R = 2y_0 \cos(\delta / 2) \sin(kx - \omega t + \delta / 2)$$

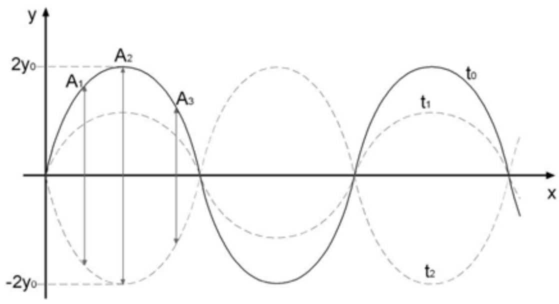
  La longitud de onda y el período de y_R son los mismos que los de y_1 e y_2.

- $\delta = 0,\ 2n\pi \Rightarrow y_R = 2y_1 = 2y_2$ (interferencia *constructiva*).

- $\delta = \pi,\ (2n+1)\pi \Rightarrow y_R = 0$ (interferencia *destructiva*).

3. Funciones de onda estacionarias

- Las perturbaciones provocadas en un medio unidimensional confinado se reflejan en sus extremos y en el medio se tienen ondas viajando en los dos sentidos, que se superponen.



- El resultado de la superposición de dos ondas harmónicas con las mismas amplitudes, frecuencia y longitud de onda es:

  $$y_R = 2y_0 \sin kx \cos \omega t$$

  se trata de una perturbación que NO se propaga llamada *onda estacionaria*.

- En la figura se representa el valor de la perturbación en función de x, en instantes de tiempo sucesivos, lo que permite visualizar que:
  - en cada punto del medio el valor de la perturbación oscila con amplitud $$A_x = 2y_0 \sin kx\ ;$$
  - existen una serie de puntos en los cuales la perturbación es nula en todo instante de tiempo, denominados NODOS;

- intercalados con los nodos existen los VIENTRES, que son aquellos puntos del medio en los que el valor de A_x es el máximo posible ($A_x = 2y_0$);
- la distancia entre los dos nodas consecutivos coincide con la que hay entre vientres consecutivos y es

$$NN = VV = \frac{\lambda}{2}$$

4. *Ondas estacionarias en una cuerda fijada por los dos extremos*

- En el caso de una cuerda de longitud *L* fijada por los dos extremos, la condición necesaria y suficiente para a tener en ella una onda estacionaria con nodos y vientres bien diferenciados es:

$$L = n\frac{\lambda_n}{2} = n\frac{v}{2\nu_n} \qquad n = 1, 2, 3...$$

- La frecuencia correspondiente a n = 1, se denomina frecuencia fundamental.

$$\nu_1 = \frac{2L}{v}$$

FísicaTema12

Superposición de ondas en una dimensión

1. Interferencia. Superposición de pulsos.
2. Superposición de dos ondas armónicas.
3. Funciones de onda estacionarias.
4. Ondas estacionarias en una cuerda fijada por los dos extremos.

1. Interferencia. Superposición de pulsos.

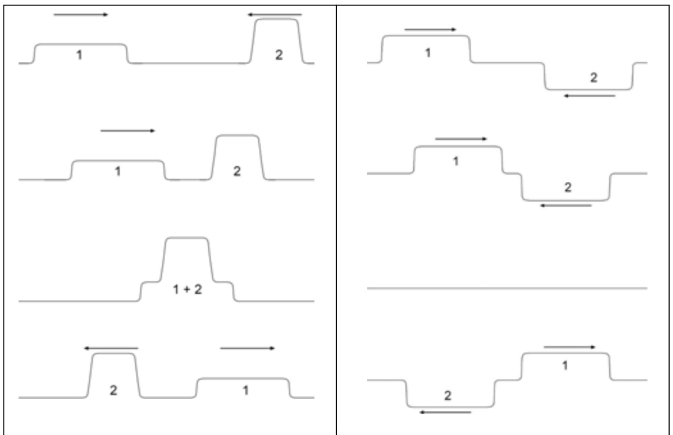
• Cuando dos o mas ondas se encuentran en un punto decimos que se produce una **interferencia**. (Si el medio es lineal) el resultado de la interferencia es la superposición o suma de las ondas que interfieren.

PRINCIPIO DE SUPERPOSICIÓN: si dos o mas ondas interfieren en un punto, entonces la función de onda resultante es la suma de las funciones de onda de cada una de ellas.

$$\left.\begin{array}{l} y_1 \\ y_2 \\ \dots \end{array}\right\} y_R = y_1 + y_2$$

1. Interferencia. Superposición de pulsos.

• Ejemplo: Superposición de pulsos en una cuerda.



Interferencia Constructiva | Interferencia Destructiva

2. Superposición de dos ondas armónicas.

• Muchos fenómenos naturales involucran ondas (sonido, ondas en agua, luz, Tv, radio…).

•En este tema, estudiaremos detalladamente la superposición de <u>dos</u> ondas armónicas.

• Para las ondas armónicas, igual que en el caso de los pulsos, se cumple el principio de superposición.

•La forma de cualquier onda, incluso en los casos mas complicados, puede describirse como una cierta suma de muchas ondas armónicas.

2. Superposición de dos ondas armónicas.

• Superposición de dos ondas armónicas que se propagan en el mismo sentido con las mismas: ν, λ, y_0, cuyas fases difieren en una constante.

$$y_1 = y_0 \sin(kx - wt)$$

$$y_2 = y_0 \sin(kx - wt + \delta)$$

Desfase constante

$$y_R = y_1 + y_2 = \underbrace{2y_0 \cos(\delta/2)}_{A_R \downarrow \text{cte}} \underbrace{\sin(kx - wt + \delta/2)}_{\text{Factor de propagación}}$$

•Onda armónica
•k, w (λ,T) coinciden con las de y_1 e y_2
•Desfase = δ/2

2. Superposición de dos ondas armónicas.

- Realización de la suma (y_1 + y_2).

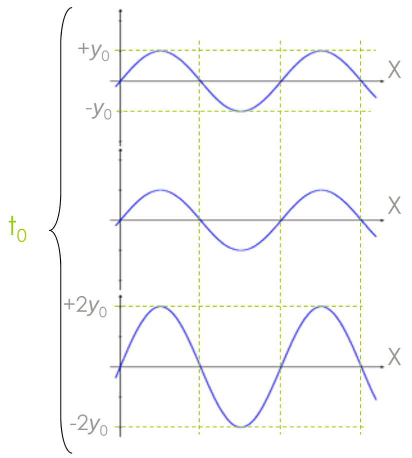
$$\sin A + \sin B = 2\sin\frac{A+B}{2}\cos\frac{A-B}{2}$$

A= (kx - wt)

B= (kx – wt + δ)

2. Superposición de dos ondas armónicas.

- Casos especialmente interesantes.
  - $\delta = 0, 2\pi, 4\pi, \ldots 2n\pi$ n= 0, 1, 2, ...



$y_1 = y_0 \sin(kx - wt_0)$

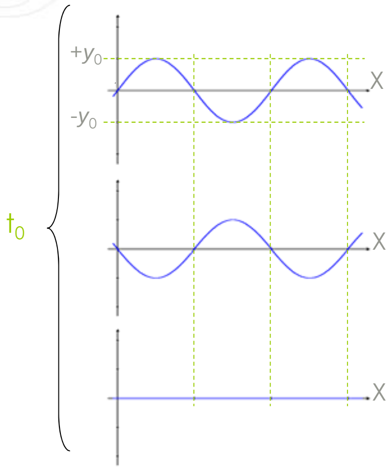
INTERFERENCIA CONSTRUCTIVA

$y_2 = y_0 \sin(kx - wt_0) = y_1$

$y_R = y_1 + y_2 =$
$= 2y_0 \sin(kx - wt_0) = 2 \cdot y_1$

2. Superposición de dos ondas armónicas.

- $\delta = \pi, 3\pi, 5\pi, \ldots (2n+1)\pi$ $\qquad n = 0, 1, 2, \ldots$



$y_1 = y_0 \sin(kx - wt_0)$

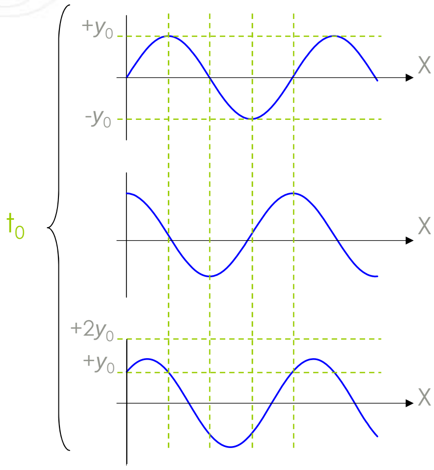
INTERFERENCIA DESTRUCTIVA

$y_2 = y_0 \sin(kx - wt_0 + \pi) = -y_1$

$y_R = y_1 + y_2 = 0$

2. Superposición de dos ondas armónicas.

- Caso intermedio: $\delta = \pi/2$



$y_1 = y_0 \sin(kx - wt_0)$

$y_2 = y_0 \sin(kx - wt_0 + \pi/2)$

$0 < y_R < 2 \cdot y_1$

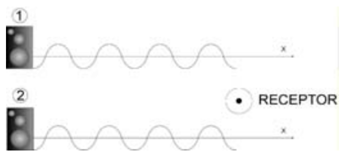
$$y_R = y_1 + y_2 = \left(\sqrt{2}\right) y_0 \sin\left(kx - wt_0 + \frac{\pi}{4}\right)$$

2. Superposición de dos ondas armónicas.

• En general, la causa física de la diferencia de fase entre dos ondas que interfieren es la diferencia de camino recorrido por las ondas desde la fuente emisora hasta el punto de interferencia.

Ejemplo 1.
Caso ideal: Dos altavoces que emiten en fase ondas con la misma frecuencia (la misma nota).

Situación A



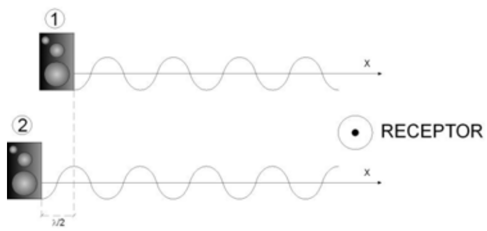
$$\left.\begin{aligned} s_1 &= s_0 \sin(kx - wt) \\ s_2 &= s_1 \qquad \delta = 0 \end{aligned}\right\} \; s_R = s_1 + s_2 = 2s_0 \sin(kx-wt)$$

INTERFERENCIA CONSTRUCTIVA

$I_1 \propto s_0^2$	$I_R \propto (2s_0)^2 = 4s_0^2 > I_1$

2. Superposición de dos ondas armónicas.

Situación B



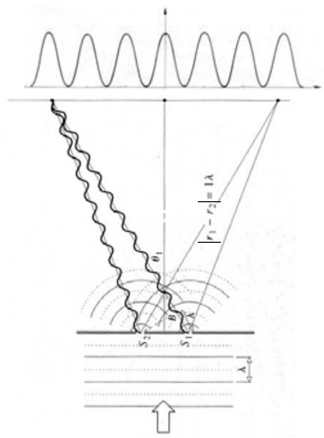
$$\left.\begin{aligned} s_1 &= s_0 \sin(kx - wt) \\ s_2 &= s_0 \sin(k(x + \lambda/2) - wt) \end{aligned}\right\} \; s_R = s_1 + s_2 = 0 \longrightarrow I_R = 0$$

INTERFERENCIA DESTRUCTIVA

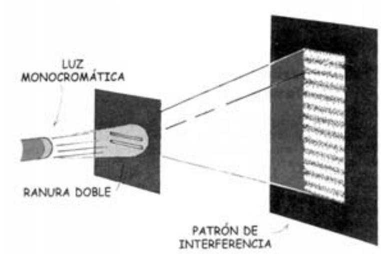
$$(fase)_2 - (fase)_1 = k\,\frac{\lambda}{2} = \frac{2\pi}{\lambda}\,\frac{\lambda}{2} = \pi$$

2. Superposición de dos ondas armónicas.

- Ejemplo 2

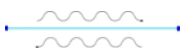


Interferencia de dos ondas de luz



3. Funciones de onda estacionarias.

- Ondas confinadas en el espacio.

  - Cuerda de guitarra 
  - Láser espejo  espejo
  - ...

→ Existen reflexiones en los extremos del medio y, por tanto, se tienen ondas viajando en los dos sentidos posibles, que se superponen de acuerdo con el principio de superposición.

3. Funciones de onda estacionarias.

• Superposición de dos ondas armónicas que viajan en sentidos contrarios, con las mismas: ν, λ, y_0.

$$y_D = y_0 \sin(kx - wt)$$
$$y_I = y_0 \sin(kx + wt)$$

$$y_R = y_D + y_I = 2y_0 \sin kx \cos wt \neq f(x - vt)$$

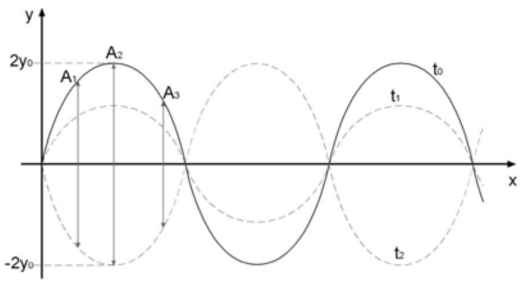
No propagación
ONDA ESTACIONARIA

3. Funciones de onda estacionarias.

• Significado físico del resultado de la superposición

$$y_R = \underbrace{2y_0 \sin kx}_{A_x} \underbrace{\cos wt}_{\text{“mas”}}$$

Amplitud del ***“mas”*** que depende de la posición, **x**, del punto



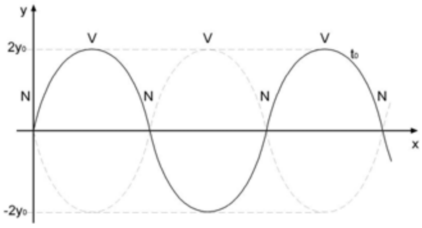
3. Funciones de onda estacionarias.

• Los puntos del medio en los cuales A_x = 0 se denominan ***NODOS***

$$A_x = 2y_0 \sin kx = 0 \;\rightarrow\; \sin kx = 0 \;\rightarrow\; kx = n\pi \;\rightarrow\; x_N = n\frac{\lambda}{2} \quad (n = 0,1,2,\ldots)$$

• Los puntos del medio que oscilan con amplitud máxima, se denominan ***VIENTRES***

$$|A_x| = 2y_0 \;\rightarrow\; \sin kx = \pm 1 \;\rightarrow\; kx = (2n+1)\frac{\pi}{2} \quad (n = \;\; ,2,\ldots$$



$$x_v = \frac{(2n+1)\pi/2}{k} = (2n+1)\frac{\lambda}{4}$$

3. Funciones de onda estacionarias.

• En un medio “finito” siempre se tienen ondas viajando en ambos sentidos debido a las reflexiones en los extremos del medio.

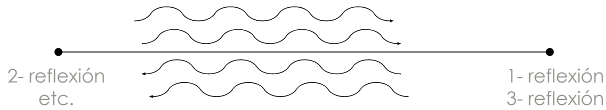
• El resultado de la superposición de estas ondas, ¿Es siempre una onda estacionaria con nodos y vientres bien diferenciados?

NO

• Como veremos en el siguiente apartado, solamente para algunos valores de la ν (o λ) de las ondas que interfieren tendremos ondas estacionarias con nodos y vientres bien diferenciados.

4. Ondas estacionarias en una cuerda fijada por los dos extremos.

- En el apartado anterior hemos analizado el resultado de la superposición de ***dos*** ondas viajando en sentidos contrarios, pero en el caso real cada onda se refleja varias veces en los extremos del medio



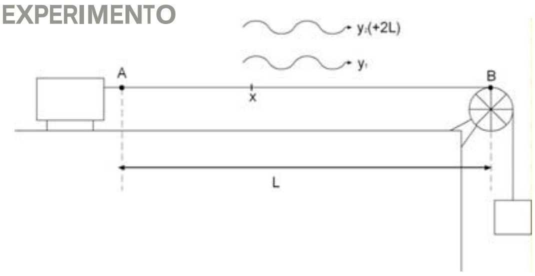
de modo que se tienen varias ondas viajando en un sentido y varias ondas viajando en el sentido contrario.

- ¿Cuál es el resultado de la superposición de todas estas ondas?
- ¿En qué condiciones el resultado de la superposición va a ser una onda estacionaria con nodos y vientres bien diferenciados?

4. Ondas estacionarias en una cuerda fijada por los dos extremos.

Se comprueba que <u>solamente</u> en el caso de que las ondas que viajan en el mismo sentido interfieran constructivamente entre si, el resultado de la superposición global será una onda estacionaria.

EXPERIMENTO



$y_1 = y_0 \sin(kx - wt)$

$y_2 = y_0 \sin(k(x + 2L) - wt)$

$\delta = k\,2L = 2n\pi$

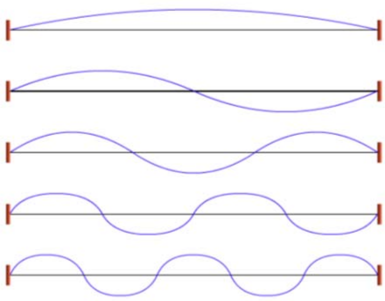
Interferencia Constructiva (n= 1, 2, 3, …)

$$\boxed{L = n\frac{\lambda}{2} = n\frac{v}{2\nu}}$$

Condición de resonancia
– Cuerda extremos fijos (A,B)

4. Ondas estacionarias en una cuerda fijada por los dos extremos.

• Dada una cuerda de longitud ***L***, a cada valor de ***n*** le corresponde una frecuencia ν_n (o longitud de onda, $\boldsymbol{\lambda}_n$) y una onda estacionaria diferente.



Oscilación fundamental

2º armónico

3º armónico

4º armónico

5º armónico

4. Ondas estacionarias en una cuerda fijada por los dos extremos.

• Nota "la" → ν_1 = 440 Hz

• Condición de resonancia (***n*** = 1) → $\boxed{L = \dfrac{v}{2\nu}}$

$$\nu = 440 \Rightarrow \nu = \frac{v}{2L} = \frac{1}{2L}\sqrt{\frac{Tensión}{\mu}}$$

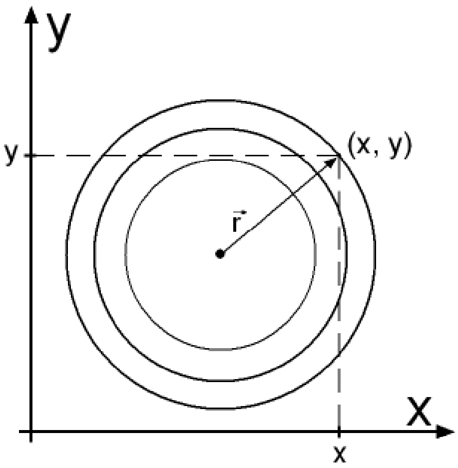
• **Valores** de ***L*** **y** ***μ*** **fijos** → **único** valor posible para la **Tensión**.

Tema 13: MOVIMIENTO ONDULATORIO EN 2D Y 3D

1. *Ondas 2D y 3D*

- **Ondas 2D**: la perturbación se propaga en un medio bidimensional (superficie) cuyos puntos se localizan mediante dos coordenadas (coordenadas cartesianas *XY*). La función de onda contiene el término de propagación, análogo al caso unidimensional.

$$f(x,y,t)=f(\vec{r},t)=f(\vec{r}-\vec{v}\cdot t)$$



- **Ondas 3D**: la perturbación se propaga en un medio tridimensional, en el espacio real, cuyos puntos se localizan mediante tres coordenadas (coordenadas cartesianas *XYZ*). La función de onda contiene el término de propagación, análogo al caso unidimensional.

$$f(x,y,z,t)=f(\vec{r},t)=f(\vec{r}-\vec{v}\cdot t)$$

2. *Frente de Onda. Rayo.*

- **Frente de Onda**: conjunto de puntos del medio a los que la perturbación llega al mismo tiempo. (En estos puntos el valor de la perturbación es el mismo en todo instante de tiempo.)
- **Rayo**: Línea dirigida perpendicularmente al frente de onda que indica el movimiento del mismo.

3. *Ondas planas, circulares y esféricas*.

- Las ondas suelen denominarse según la forma geométrica de sus frentes de onda.
    - o Ondas **planas 2D**: los frentes de onda son líneas paralelas entre sí.
    - o Ondas **planas 3D**: los frentes de onda son planos paralelos entre sí.
    - o En ambos casos, los rayos son líneas rectas, perpendiculares a los frentes de onda, y paralelas entre si.
    - o La descripción matemática de las ondas planas requiere una única coordenada espacial. Función de onda: ***f (x, t)***.

    - o Ondas **circulares**: Corresponden a una fuente puntual en el caso 2D.
    - o Ondas **esféricas**: Corresponden a una fuente puntual en el caso 3D.
    - o En ambos casos los rayos son líneas en la dirección radial.

4. *Propagación de la energía asociado a las ondas 2D y 3D. Intensidad.*

- De acuerdo con el principio de conservación de la energía, para cualquier onda, la energía total de los puntos que conforman un frente de onda debe ser ***ΔE*** (energía foco).

- La **intensidad** de una onda se define como la energía transmitida por unidad de tiempo y por unidad de superficie (sobre un frente de onda en el caso más sencillo). Se trata de una magnitud que permite evaluar la energía de la onda en cada punto del medio.

$$\mathrm{I} = \frac{\Delta E / \Delta t}{S} (W / m^2)$$

- Foco puntual (la onda se propaga en todas direcciones): sobre un frente de onda situado a una distancia **r' > r** la intensidad sería **I' < I**.

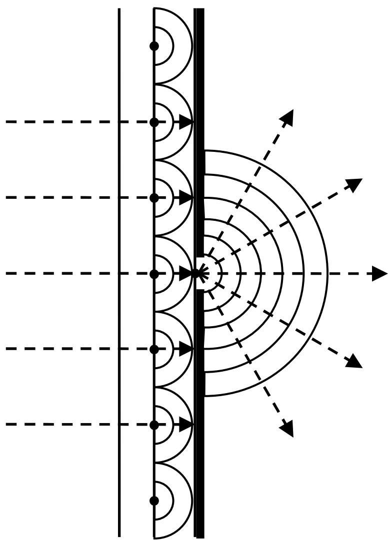
$$\mathrm{I} = \frac{\Delta E / \Delta t}{S} = \frac{\Delta E / \Delta t}{4\pi r^2}$$

- Onda plana (se propaga en una única dirección): la superficie del frente de onda es la misma a lo largo de todo el recorrido de la onda, por tanto la intensidad es también la misma. En este caso **r' > r** $\rightarrow$ **I' = I**

5. Principio de Huygens. Difracción.

- **Principio de Huygens.** Todo punto de un frente de onda pude considerarse como una fuente de pequeñas "ondas secundarias" esféricas (circulares 2D). La superposición de estas ondas secundarias da como resultado la onda (primaria) que observamos. La frecuencia y la velocidad de las ondas secundarias son las mismas que en las primarias.
    - Con el principio de Huygens se explican satisfactoriamente las leyes de la reflexión y de la refracción en relación a la orientación de los rayos.

- **Difracción.** Los cambios de dirección de propagación que se observan cuando se interponen obstáculos en el recorrido de una onda se conocen con el nombre de difracción de dicha onda.
    - La **difracción** es un fenómeno que permite visualizar las ondas secundarias enunciadas por Huygens.
    - Las **partículas** (clásicas) **no** se difractan.
    - OBSTÁCULO = pared con una abertura.
        - La onda "después" de la abertura es la resultante de la suma de ondas secundarias en los puntos de dicha abertura.
        - Se comprueba que el resultado de la superposición depende del tamaño, ***d***, de la abertura.



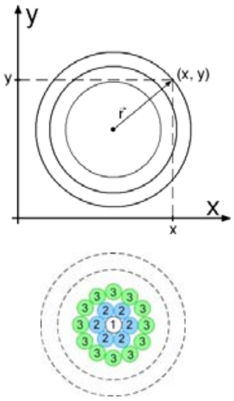
FísicaTema13

Movimiento Ondulatorio en 2D y 3D

1. Ondas 2D y ondas 3D
2. Frente de onda. Rayo.
3. Ondas planas, circulares y esféricas.
4. Propagación de la energía asociada a las ondas 2D y 3D. Intensidad.
5. El Principio de Huygens. Difracción.

1. Ondas 2D y 3D.

• ***Ondas 2D***: la perturbación se propaga en un medio bidimensional (superficie) cuyos puntos se localizan mediante un sistema de coordenadas cartesianas XY



•Ondulaciones que aparecen en la superficie del agua al tirar un objeto (puntual) en un lago, charco, piscina, ….

•A partir del punto de impacto, la perturbación se propaga a la misma velocidad en todas direcciones sobre la superficie.

•El impacto produce una "oscilación complicada" de las partículas superficiales afectadas por el mismo.

•Debido, en ultima instancia, a las fuerzas de enlace, la oscilación se transmite a las partículas vecinas.

1. Ondas 2D y 3D.

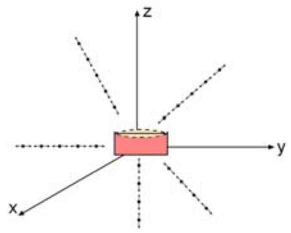
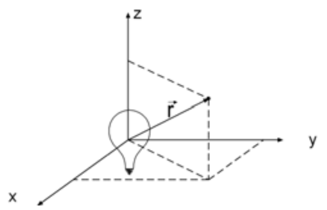
• Descripción matemática de una onda 2D.

$$f(x,y,t)=f(\vec{r},t)=f(\vec{r}-\vec{v}\cdot t)$$

Función de onda: describe la propagación

1. Ondas 2D y 3D.

• ***Ondas 3D***: la perturbación se propaga en un medio tridimensional, en el espacio real, cuyos puntos se localizan mediante un sistema de coordenadas cartesianas X, Y, Z.

Ejemplos	
 •El sonido que produce el tambor se propaga en todas direcciones.	 •La luz que emite la bombilla se propaga en todas direcciones.

•Descripción matemática → $f(x,y,z,t)=f(\vec{r},t)=f(\vec{r}-\vec{v}\cdot t)$

2. Frente de Onda. Rayo.

• ***Frente de Onda***: conjunto de puntos del medio a los que la perturbación llega al mismo tiempo.(En estos puntos el valor de la perturbación es el mismo en todo instante de tiempo)

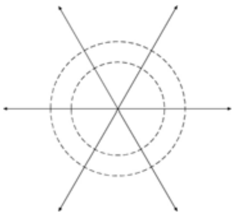
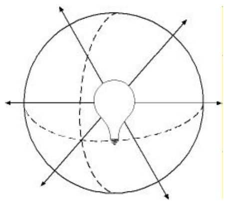
•Cuerda → Los frentes de onda están constituidas por un único punto.

•Ondas en la superficie del agua → Los frentes de onda son círculos concéntricos, cuyo centro es el punto de impacto del objeto (ejemplo anterior).

•Ondas luminosas ("bombilla puntual") → Los frentes de onda son esferas cuyo centro es la bombilla.

2. Frente de Onda. Rayo.

•*Rayo*: Línea dirigida perpendicularmente al frente de onda que indica el movimiento del mismo.

Ejemplos	
Ondas producidas en la superficie del agua por un objeto "Puntual"  ***Frentes de Onda***: Círculos concéntricos. ***Rayos***: dirección radial y el **sentido** que corresponde a la **propagación**.	La luz que emite la bombilla se propaga en todas direcciones.  ***Frentes de Onda***: Esferas concéntricas. ***Rayos***: dirección radial y el **sentido** que corresponde a la **propagación**.

3. Ondas planas, circulares y esféricas.

•Las ondas suelen denominarse según la forma geométrica de sus frentes de onda.

- Ondas Planas

  2D → Los frentes de onda son líneas paralelas entre sí.

  - Lanzando al agua un objeto alargado, tipo bastón, se obtienen ondulaciones paralelas a él sobre la superficie del agua.

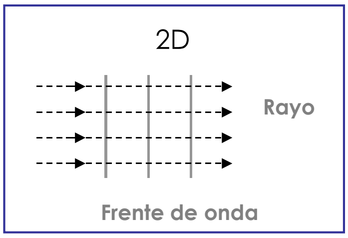
  3D → Los frentes de onda son planos.

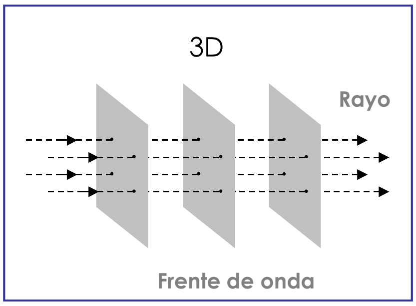
  - Un LASER emite una onda luminosa plana. Los frentes de onda procedentes de una bombilla puntual situada en el infinito, también son planos.

→ En ambos casos, los rayos son líneas rectas, perpendiculares a los frentes de onda, y paralelas entre si.

3. Ondas planas, circulares y esféricas.

ONDAS PLANAS





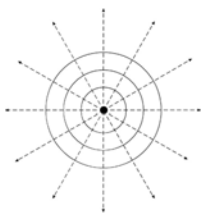
• La descripción matemática de las ondas planas requiere una **única coordenada** espacial. Función de onda: ***f (x, t)***.

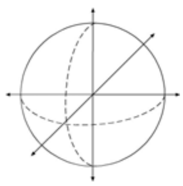
• El **tamaño de los frentes de onda** se mantiene **constante** a lo largo del recorrido de la perturbación.

3. Ondas planas, circulares y esféricas.

• Ondas **circulares**: Corresponden a una **fuente puntual** en el caso **2D**

• Ondas **esféricas**: Corresponden a una **fuente puntual** en el caso **3D**

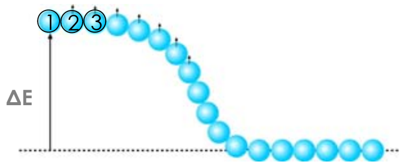




• El **tamaño de los frentes de onda aumenta** progresivamente a lo largo del recorrido de la perturbación.

4. Propagación de la energía asociado a las ondas 2D y 3D. Intensidad.

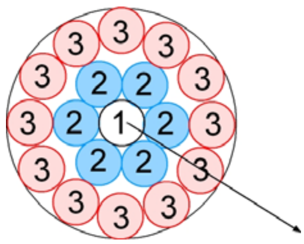
• En el caso de una cuerda perfectamente elástica, al producir una perturbación en uno de sus extremos, transmitimos una cierta energía ΔE a la primera partícula de la cuerda.



• Debido a la propagación, esta energía se transmite íntegramente de 1 a 2, de 2 a 3, y así sucesivamente.

4. Propagación de la energía asociado a las ondas 2D y 3D. Intensidad.

• Cuando lanzamos al agua un objeto "puntual", "la partícula" situada en el punto de impacto adquiere una cierta cantidad de energía ***ΔE***.



• Debido a la propagación, esta energía se transmite a las partículas 2, en contacto directo con el punto de impacto. Desde las partículas 2 la energía se transmite a las partículas 3, y así sucesivamente.

4. Propagación de la energía asociado a las ondas 2D y 3D. Intensidad.

• De acuerdo con el principio de conservación de la energía, la energía total de las partículas 2 debe ser ***ΔE***. Por lo tanto la "energía por partícula" en el circulo 2 es inferior a ***ΔE***

$$E_{2} < \Delta E$$

• Análogamente la energía total de las partículas 3 es ***ΔE***. Dado que el número de partículas situadas sobre el círculo 3 es mayor que en el caso anterior, la energía de cada partícula en esta posición cumple

$$E_{3} < E_{2} < \Delta E$$

• A medida que nos alejamos del origen o foco de la onda, la "energía por partícula" disminuye.

FísicaTema13

4. Propagación de la energía asociado a las ondas 2D y 3D. Intensidad.

• Para cualquier onda, la energía total de los puntos que conforman un frente de onda debe ser ***ΔE*** (energía foco).

⬇

Ondas circulares y esféricas (**foco puntual**): La **"energía en cada punto" disminuye con la distancia** al foco o, lo que es lo mismo, con el radio del frente de onda.

⬇

Se describe formalmente a través de la **Intensidad**.

4. Propagación de la energía asociado a las ondas 2D y 3D. Intensidad.

- La **intensidad** de una onda:

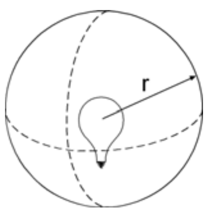
$$\mathrm{I} = \frac{\Delta E / \Delta t}{S} (W/m^2)$$

→ **Energía transmitida por unidad de tiempo y por unidad de superficie.**

Energía en cada punto → Energía por unidad de superficie (del frente de onda)

4. Propagación de la energía asociado a las ondas 2D y 3D. Intensidad.

- EJEMPLO 1: Bombilla "**puntual**" (emite luz en todas direcciones).



- La energía ("la luz"), llega al mismo tiempo a todos los puntos del frente de onda esférico de la figura.
- $\frac{\Delta E}{\Delta t}$ = Potencia de la bombilla (W)
- Intensidad de la luz sobre el frente de onda de la figura (superficie del frente de onda: $S = 4\pi r^2$).

$$\mathrm{I} = \frac{\Delta E / \Delta t}{S} = \frac{\Delta E / \Delta t}{4\pi r^2} \qquad r \uparrow \Rightarrow \mathrm{I} \downarrow$$

- A lo largo del recorrido de la onda, la **energía total** transmitida por unidad de tiempo se mantiene **constante**, pero la **intensidad**, **disminuye** con la distancia al foco emisor.

FísicaTema13

4. Propagación de la energía asociado a las ondas 2D y 3D. Intensidad.

- EJERCICIO: "El spray de pintura".

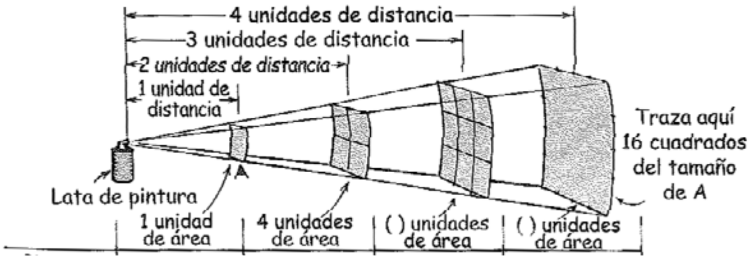


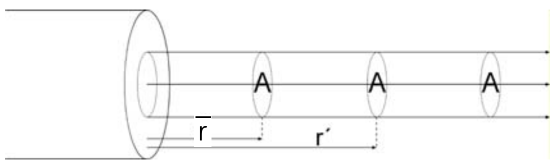
Figura: P. G. Hewitt. FÍSICA CONCEPTUAL.
Pearson – Addison Wesley. Novena edición.

FísicaTema13

4. Propagación de la energía asociado a las ondas 2D y 3D. Intensidad.

- EJEMPLO 2: Fuente LASER

→ Emite luz en una única dirección (**onda plana**).



- La superficie, **A**, del frente de onda es la misma a lo largo de todo el recorrido de la luz.
- Por tanto la intensidad es también la misma

→ En este caso **r' > r**
pero $I' = I$

5. Principio de Huygens. Difracción.

a) Principio de Huygens

Todo **punto de un frente de onda** pude considerarse como una **fuente** de pequeñas **"ondas secundarias"** esféricas (circulares 2D). La **superposición** de estas ondas secundarias da como resultado la **onda (primaria)** que observamos.

ν, v ondas secundarias = ν, v ondas primarias

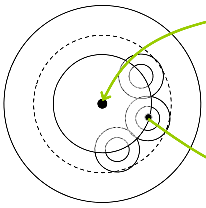
FísicaTema13

5. Principio de Huygens. Difracción.

a) Principio de Huygens

EJEMPLO: ondas circulares producidas por el impacto de una piedra en la superficie del agua.

Foco emisor de la onda primaria: FUENTE ≡ **"oscilación"**



Cuando la onda llega a un punto del medio, éste adquiere una **"oscilación"** ≡ FUENTE de la onda secundaria.

Solamente se observan las ondas primarias.

ÓpticaiOptometría

5. Principio de Huygens. Difracción.

a) Principio de Huygens.

- Con el principio de Huygens se explican satisfactoriamente las leyes de la **reflexión** y de la **refracción** en relación a la orientación de los rayos.
- El principio de Huygens también explica satisfactoriamente el fenómeno ondulatorio conocido con el nombre de **difracción**.

5. Principio de Huygens. Difracción.

b) Difracción.

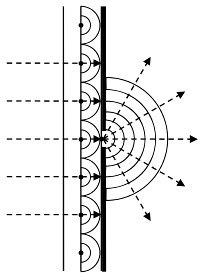
- Los **cambios de dirección de propagación** que se observan cuando se interponen **obstáculos** en el recorrido de una onda se conocen con el nombre de **difracción** de dicha onda.
- La **difracción** es un fenómeno que permite visualizar las ondas secundaria enunciadas por Huygens.
- Las **partículas** (clásicas) **no** se difractan.

5. Principio de Huygens. Difracción.

b) Difracción.

OBSTÁCULO = pared con una abertura.

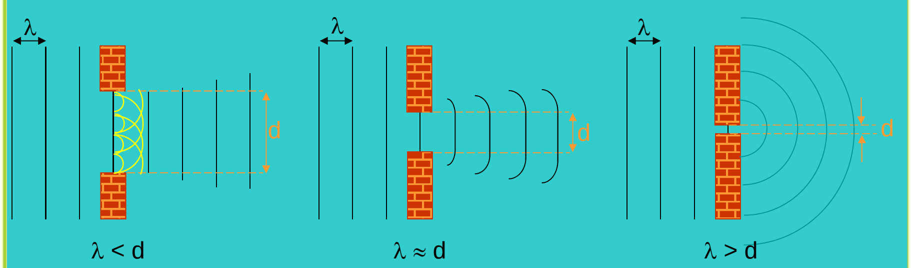
- La onda "después" de la abertura es la resultante de la suma de ondas secundarias en los puntos de dicha abertura.
- Se comprueba que el resultado de la superposición depende del tamaño, ***d***, de la abertura.



5. Principio de Huygens. Difracción.

b) Difracción.

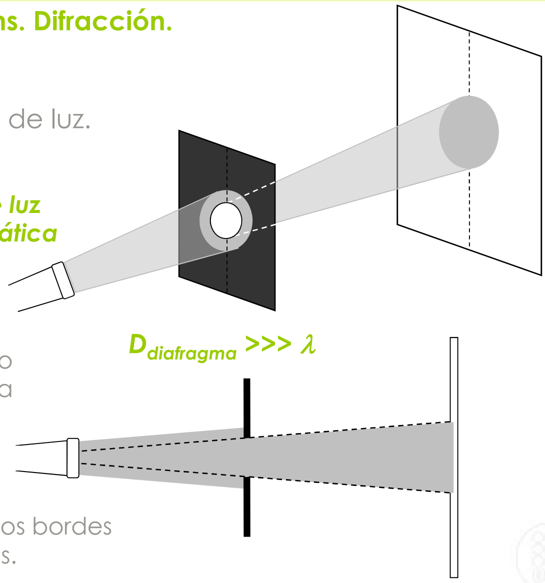
- EJEMPLO 1: Ondas en la superficie del agua.



5. Principio de Huygens. Difracción.

b) Difracción.

- EJEMPLO 2: Onda de luz.



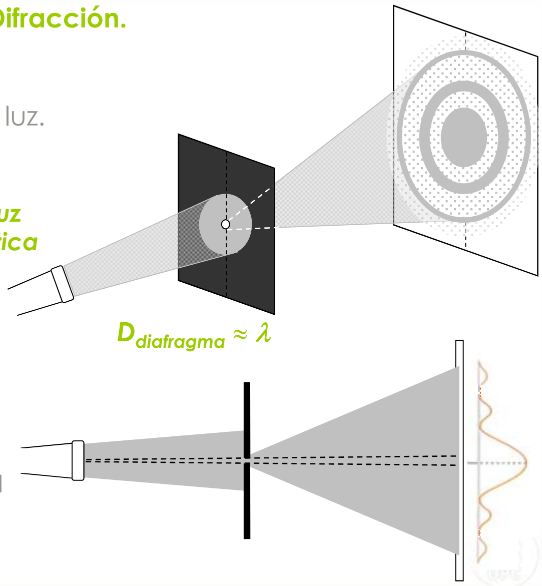
La zona iluminada de la pantalla corresponde al trazado de rayos previsto por la óptica geométrica

Efectos difractivos en los bordes → "poco" perceptibles.

5. Principio de Huygens. Difracción.

b) Difracción.

- EJEMPLO 2: Onda de luz.



La zona iluminada de la pantalla **NO corresponde** al trazado de rayos previsto por la óptica geométrica

5. Principio de Huygens. Difracción.

b) Difracción.

- EJEMPLO 2: Onda de luz.

Intensidad de luz sobre la pantalla

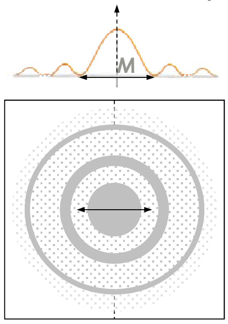
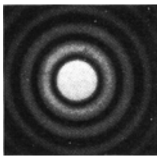


Imagen correspondiente a un caso real



Si $D_{diafragma} \rightarrow 0$ entonces $M \rightarrow \infty$

TEMA 14: INTRODUCCIÓN MATEMÁTICA

1.- *Campos escalares. Ejemplos.*

- Des del punto de vista matemático, un campo escalar es una aplicación de R^3 en R. Eso quiere decir que a cada punto del espacio (R^3) le corresponde un escalar, que es función de las coordenadas del punto y el tiempo.

$$\vec{r}:(x,y,z) \rightarrow f = f(x,y,z,t)$$

- *Ejemplos*: La presión atmosférica, la densidad de un fluido.

2.- *Campos vectoriales. Ejemplos.*

- Un campo vectorial es aplicación de R^3 en R^3. A cada punto del espacio (R^3) le corresponde un vector, las componentes del cual son función de las coordenadas del punto y del tiempo.

$$\vec{r}:(x,y,z) \rightarrow \vec{A}:(Ax,Ay,Az) \quad \begin{cases} Ax : Ax(x,y,z,t) \\ Ay : Ay(x,y,z,t) \\ Az : Az(x,y,z,t) \end{cases}$$

- En una zona del espacio dónde exista un campo vectorial, se definen *líneas de campo* como líneas tales que en cada uno de sus puntos, el vector campo está dirigido según su tangente.

- *Ejemplos*: El campo de velocidades en un fluido, el campo gravitatorio, el campo eléctrico.

FísicaTema14

Introducción Matemática

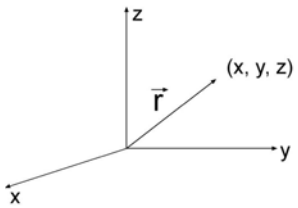
ÒpticaiOptometria

1. Campos escalares y campos vectoriales.

1. Campos escalares y campos vectoriales.

a) Campo escalar

- En una zona del espacio existe un campo escalar si a cada punto de esta zona le corresponde un valor, f, que depende de las coordenadas de este punto y del tiempo.



$$R^3 \longrightarrow R$$

$$(x,y,z) \longrightarrow f=f\,(\underbrace{x,y,z}_{\vec{r}},t)$$

Ejemplos → Magnitudes físicas

- La temperatura de una habitación: $T(\vec{r},t)$
- La presión atmosférica: $P(\vec{r},t)$
- La densidad de un fluido: $\rho(\vec{r},t)$

FísicaTema14

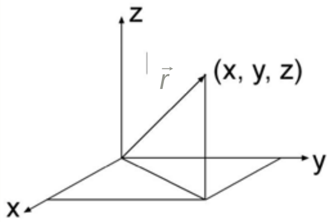
1. Campos escalares y campos vectoriales.

b) Campo vectorial

- En una zona del espacio existe un campo vectorial si a cada punto de esta zona le corresponde un vector, $\vec{A}$, cuyas componentes dependen de las coordenadas del punto y del tiempo.

$$R^3 \longrightarrow R^3$$

$$(x,y,z) \longrightarrow \vec{A} \begin{cases} A_x=A_x\,(x,y,z,t) \\ A_y=A_y\,(x,y,z,t) \\ A_z=A_z\,(x,y,z,t) \end{cases}$$



Ejemplos → Magnitudes físicas

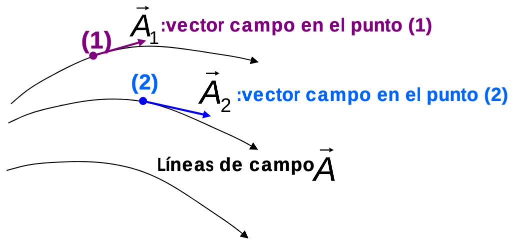
- La velocidad de un fluido: $\vec{v}(\vec{r},t)$
- El campo eléctrico
- El campo magnético

1. Campos escalares y campos vectoriales.

b) Campo vectorial

- ***Líneas de campo***: son líneas tales que, en cada uno de sus puntos el campo está dirigido según su tangente.

  (Se utilizan para representar gráficamente, o "dibujar" el campo.)



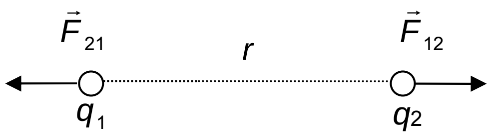
Lección 15: El CAMPO ELECTROSTÁTICO

1.- *Carga eléctrica. Estructura eléctrica de la materia*

- Existen dos clases de carga eléctrica, llamadas positiva y negativa.
- La carga eléctrica siempre se presenta por múltiplos enteros de la unidad fundamental de carga *e.* La carga del electrón es –*e* y la del protón +*e*.
- La carga se conserva, es decir, ni se crea ni se destruye en el proceso de carga; simplemente se transfiere.

2.- *Ley de Coulomb. Unidades de carga*

- La ley de Coulomb fue deducida experimentalmente y es directamente aplicable a cargas puntuales. Esta ley establece que dos partículas con carga eléctrica interaccionan entre sí con fuerzas que pueden ser atractivas, si las cargas son de signo contrario, o bien repulsivas, si las cargas son del mismo signo. En la figura se esquematiza el caso de dos partículas con cargas q_1 y q_2 positivas, separadas una distancia *r*.



Módulo: $F_{12} = F_{21} = K\dfrac{q_1 q_2}{r^2}$

Dirección: la de la recta que une las dos partículas

Sentido: depende del signo de las cargas

donde K = 8,99 x 10^9 N·m²/C² ≈ 9· 10^9 Nm²/C² es la constant de Coulomb.

- La constante de Coulomb *K* se escribe frecuentemente en función de la permitividad eléctrica del vacío ε_0:

$$K = \frac{1}{4\pi\varepsilon_0} \qquad \text{donde} \qquad \varepsilon_0 = 8{,}85 \cdot 10^{-12}\ \ \mathrm{C^2/Nm^2}.$$

- En el sistema internacional, la unidad de carga es el Coulomb (C). El valor absoluto de la carga del electrón y del protón es e=1,06 · 10^{-19} C.

3.- *El campo eléctrico.*

- El campo eléctrico en un punto se define como la fuerza eléctrica por unidad de carga que experimenta una carga de prueba (o testigo) positiva, situada en este punto

$$E = \frac{F_{el}}{q_0} \qquad \text{(N/c)}$$

- La F_{el} sobre q_0 es debida necesariamente a la presencia de otras cargas, que las entendemos como "creadores" del campo eléctrico.

- El campo eléctrico debido a diversas cargas es la suma vectorial de los campos que crearían cada una de las cargas individualmente (*principio de superposición*).

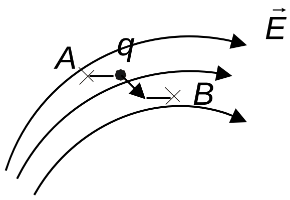
$$\vec{E} = \sum_i \vec{E}_i$$

4.- *Líneas de campo*

- El campo eléctrico puede representarse mediante líneas de campo, que se definen como líneas tangentes al vector campo en todos sus puntos. La ley de Coulomb permite demostrar que las líneas de campo eléctrico empiezan siempre las cargas positivas y terminan en las cargas negativas.

5.- energía *potencial electrostàtica*

- La fuerza de Coulomb es conservativa, lo que quiere decir que existe una energía potencial asociada a ella llamada energía potencial electrostática, U^{el}. A cualquier partícula con carga eléctrica situada en una zona del espacio dónde existe un campo eléctrico le corresponde una energía potencial electrostática que dependa de su posición. Siguiendo con la definición genérica de energía potencial, si la partícula recorre el camino *AB* (ver figura), entonces:



$$U_B^2 - U_A^2 = -W_{AB}^{el} = -\int_A^B \vec{F}_{el} \cdot d\vec{r}$$

donde, $\vec{F}_{el}$, es la fuerza eléctrica que experimenta la carga *q* debido al campo eléctrico, y W_{AB}^{el} es el trabajo que realiza esta fuerza sobre la carga a lo largo del recorrido *AB.*

- La energía potencial electrostática de una partícula cargada situada en un punto *P* solo se puede definir en relación a un segundo *punto de referencia*.

$$U_P^{el} = U_P^{el} - U_{ref.}^{el} = +\int_P^{ref.} \vec{F}_{el} \cdot d\vec{r}$$

6.- *Potencial eléctrico*

- En cualquier zona del espacio donde existe un campo eléctrico, también existe un campo escalar llamado “*potencial eléctrico*”.

- En el caso esquematizado en el apartado anterior, la diferencia de potencial (V_B – V_A) se define como:

$$\Delta V = V_B - V_A = \frac{-W_{AB}^{el}}{q_0} = -\int_A^B \vec{E} \cdot d\vec{r}$$

donde q_0 es una carga de prueba positiva. Se demuestra que (V_B – V_A) sólo depende del valor del campo y no del valor de la carga de prueba.

- De la definición también se deduce que: $(V_B - V_A) = \dfrac{U_B^{el} - U_A^{el}}{q_0}$

- Análogamente el caso de la energía potencial, el potencial eléctrico que le corresponde a un punto *P*:

$$V_P = V_P - V_{ref} = \int_P^{ref} \vec{E} \cdot d\vec{r} = \frac{U_P}{q_0}$$

- La unidad SI de potencial y de diferencia de potencial es el voltio (V): 1 V = 1 J/C. En función de esta unidad, la unidad del campo eléctrico puede ser expresada como:

  1 N/C = 1 V/m

- El potencial eléctrico debido a varias cargas es la suma de los potenciales que crearían cada una de les cargas individualmente.

$$V = \sum_i V_i$$

1. Carga eléctrica. Estructura eléctrica de la materia.

- Los fenómenos eléctricos se conocen desde muy antiguo (~ 600 a J) pero el estudio cuantitativo de los mismos es mucho más reciente (s. XIX).
- Hoy sabemos que:
  - ❖ La carga eléctrica, q, puede entenderse como una propiedad de la materia o de las partículas materiales.
  - ❖ Existen dos tipos de carga eléctrica, que denominamos
    - carga positiva: q^+
    - carga negativa: q^-
  - ❖ Las partículas materiales con $q \neq 0$ experimentan fuerzas de interacción entre ellas, debido a su carga. Las fuerzas pueden ser de atracción o de repulsión (dos tipos de carga ⟶ dos tipos de fuerza)

FísicaTema15

1. Carga eléctrica. Estructura eléctrica de la materia.

- ❖ materia ⟶ átomos
  - Núcleo: protones ($q_p > 0$) y neutrones ($q_n = 0$)
  - Corteza: electrones ($q_e < 0$)
- ❖ $|q_p| = |q_e| = e$
- ❖ átomo <u>neutro</u> (número protones = número electrones)
- ❖ Habitualmente para "cargar" un objeto inicialmente neutro se añaden o se extraen electrones (**no** protones)
- ❖ Objeto $q^+ \rightarrow$ número protones > número electrones
- ❖ Objeto $q^- \rightarrow$ número protones < número electrones

- La carga eléctrica <u>se conserva</u> (ni se crea, ni se destruye).
- La carga eléctrica está cuantificada ($q = ne$)

FísicaTema15

El camp **Electrostàtic** APÈNDIX

Resultats del càlcul del camp i el potencial elèctrics corresponents a diverses distribucions de càrrega (el càlcul del camp s'ha fet aplicant o bé la llei de Coulomb, o bé el teorema de Gauss)

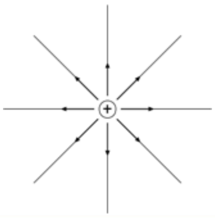
ÒpticaiOptometria

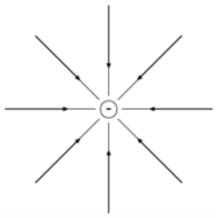
4. Línies de camp.

(Diverses distribucions de càrrega "creadores" de camp elèctric amb les línies de camp corresponents)

a) Càrrega puntual.
(r és la distància a la càrrega)

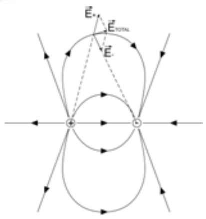
$$\vec{E} = \begin{cases} K\dfrac{Q}{r^2} \\ radial \\ repulsiu\,(Q^+) \end{cases} \qquad \vec{E} = \begin{cases} K\dfrac{Q}{r^2} \\ radial \\ atractiu\,(Q^-) \end{cases}$$





4. Línies de camp.

b) Dipol elèctric. Vàries càrregues puntuals.



En el cas del dipol (figura), a cada punt $\vec{E}_{tot} = \vec{E}^{+} + \vec{E}^{-}$

Per vàries càrregues puntuals $\vec{E}_{tot} = \vec{E}_1 + \vec{E}_2 + \vec{E}_3 + \ldots$

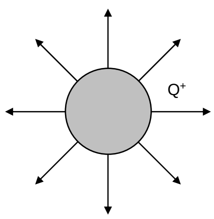
4. Línies de camp.

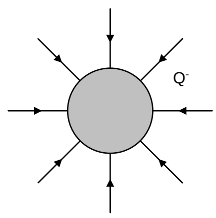
c) Distribució esfèrica de càrrega de radi R:
(r és la distància al centre de l'esfera)

c.1) $r > R$

- ***sigui com sigui l'esfera (massissa o buida per dintre)***

$$\vec{E} = \begin{cases} K\dfrac{Q}{r^2} \\ radial \\ repulsiu\,(Q^{+}) \end{cases} \qquad \vec{E} = \begin{cases} K\dfrac{Q}{r^2} \\ radial \\ atractiu\,(Q^{-}) \end{cases}$$





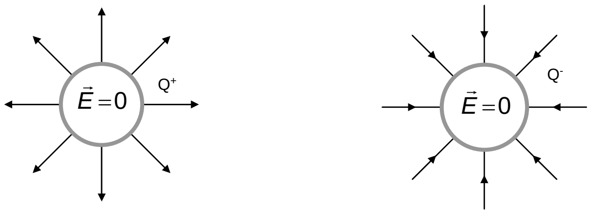
4. Línies de camp.

c) Distribució esfèrica de càrrega de radi R:
(r és la distància al centre de l'esfera)

c.2) $r \leq R$

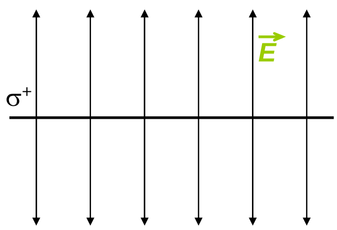
- *només considerarem el cas d'una escorça esfèrica*

$\vec{E} = 0$



4. Línies de camp.

d) Pla carregat "infinit" (σ : densitat superficial de càrrega en C/m²).

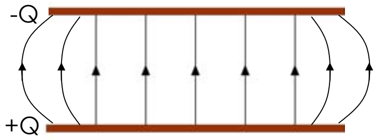


$$\vec{E} = \begin{cases} \dfrac{\sigma}{2\varepsilon_0} \\ \perp \text{ pla} \\ \text{repulsiu}\,(\sigma^+) \end{cases}$$

$$\sigma = \frac{Q}{A} \text{ (C/m}^2\text{)}$$

4. Línies de camp.

e) Dues làmines planes i paral·leles entre si, amb càrrega igual en valor absolut i de signe contrari.



- *El camp elèctric només és diferent de zero en la zona de l'espai compresa entre les dues làmines.*

- *Excepte a les vores de les làmines, el camp és uniforme, és a dir, té el mateix valor a tots els punts. Per això les línies de camp resulten rectes i paral·leles entres sí (veure figura). En aquesta zona el mòdul del camp és:*

$$E = \frac{\sigma}{\varepsilon_0} = \frac{|Q|}{A\varepsilon_0}$$

on A és l'àrea de les làmines.

7.- Potencial elèctric.

(*Valors del potencial elèctric a tots els punts de l'espai, corresponents a diverses distribucions de càrrega "creadores" de camp elèctric.*)

a) Càrrega puntual.
(r és la distància a la càrrega)

- $Q > 0 \rightarrow V = +K\frac{|Q|}{r}$, *prenent com a punt de referència* $r = \infty$

- $Q < 0 \rightarrow V = -K\frac{|Q|}{r}$, *prenent com a punt de referència* $r = \infty$

b) Dipol elèctric. Vàries càrregues puntuals.

$$V_{tot} = V_1 + V_2 + V_3 + ...$$

7.- Potencial elèctric.

c) Distribució esfèrica de càrrega de radi R:

c.1) r > R, sigui com sigui l'esfera (massissa o buida per dintre)

- $Q_{esfera} > 0 \rightarrow V = +K\frac{|Q|}{r}$ *, prenent com a punt de referència r = ∞*
- $Q_{esfera} < 0 \rightarrow V = -K\frac{|Q|}{r}$ *, prenent com a punt de referència r = ∞*

c.2) r ≤ R, només en el cas d'una escorça esfèrica

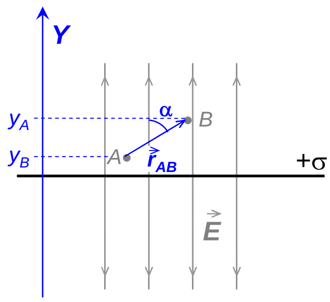
- $Q_{esfera} > 0 \rightarrow V = +K\frac{|Q|}{R} = ctn$*, prenent com a punt de referència r = ∞*
- $Q_{esfera} < 0 \rightarrow V = -K\frac{|Q|}{R} = ctn$*, prenent com a punt de referència r = ∞*

NOTA: adoneu-vos que r és una distància genèrica al centre de l'esfera, que pot tenir qualsevol valor, mentre que R és el radi de l'esfera, que és un valor determinat.

7.- Potencial elèctric.

d) Pla carregat "infinit"
(σ: densitat superficial de càrrega en C/m2).

Donat que el camp és uniforme i té el mateix valor a tots els punts de cada un dels semiespais en que el pla divideix l'espai:



$$V_A - V_B = \vec{E}\cdot\vec{r}_{AB} = E\, r_{AB}\cos\alpha = \frac{\sigma}{2\varepsilon_0}\cdot(y_B - y_A)$$

sempre que A i B siguin al mateix semiespai.

Lección 16: CONDUCTORES Y DIELÉCTRICOS

1.- *Materiales conductores y dieléctricos*

- En aplicar un campo eléctrico sobre un material conductor, se observa un movimiento de partículas con carga eléctrica en su interior. Por eso decimos que los materiales conductores "*conducen*" bien electricidad.

- Los materiales dieléctricos o aislantes no conducen bien la electricidad, el que quiere decir que en aplicar un campo eléctrico sobre ellos, no se observa movimiento de cargas.

2.- *Carga libre, carga atada y carga neta*

- Los conductores tienen "carga libre", es decir, partículas cargadas no atadas a ningún átomo o molécula en particular, que se pueden mover libremente por todo el volumen del material.

- Los dieléctricos no tienen carga libre. Todas las partículas cargadas que contienen, están ligadas a un átomo o molécula particular, ocupando una posición localizada a su alrededor.

- Cualquier material tiene carga neta cuando el nº de protones que contiene no coincide con el de electrones.

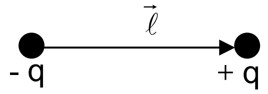
3.- *Comportamiento de materiales conductores sometidos a la acción de un campo electrostático.*

- Si se aplica un campo electrostático sobre un material conductor, sus cargas libres se redistribuyen hasta llegar a la situación de equilibrio electrostático. En la situación de *equilibrio electrostático*, el valor del campo eléctrico al interior del conductor es $\vec{E}_{\text{int}} = 0$.

4.- *Comportamiento de materiales dieléctricos sometidos a la acción de un campo electrostático.*

- Las moléculas de los *dieléctricos polares* son pequeños dipolos. El resto de dieléctricos se denominan *no polares.*

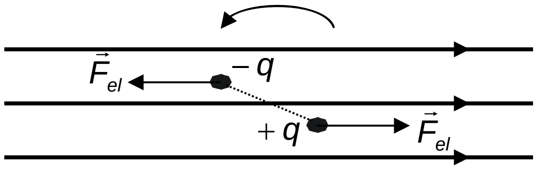
- Un dipolo eléctrico es un sistema de dos cargas del mismo valor pero de signo contrario, separadas una pequeña distancia. El momento dipolar $\vec{p}$ es:



$$\vec{p} = q\vec{\ell}$$

Es importante resaltar que el sentido del vector $\vec{p}$ apunta hacia la carga positiva del dipolo.

- En un campo eléctrico uniforme, la fuerza neta que actúa sobre un dipolo es cero, pero existe un momento τ que produce un giro del dipolo hasta alinearlo en la dirección del campo.



- En aplicar un camp eléctrico sobre un material dieléctrico (polar o no), este se polariza:
  - o en el caso de los dieléctricos polares eso quiere decir que los pequeños dipolos que lo constituyen se orientan paralelamente al campo;
  - o en el caso de los no polares lo que pasa es que sus moléculas es devienen pequeños dipolos debido a la acción del campo.

- Como consecuencia, el campo eléctrico en el interior del dieléctrico resulta

$$\vec{E}_{\text{int}} = \frac{\vec{E}_{ext}}{\varepsilon_r}$$

donde $\vec{E}_{ext}$ es el campo aplicado sobre el dieléctrico, y ε_r es la constante dieléctrica del material. Para todos los dieléctricos.ε_r>1, por lo tanto

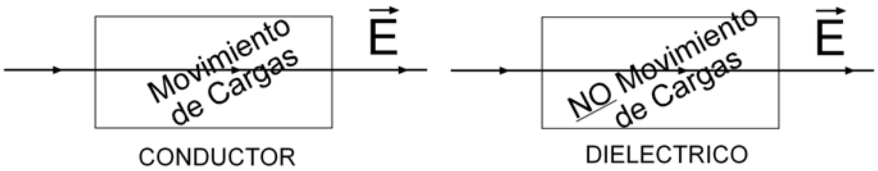
$$\left|\vec{E}_{\text{int}}\right| < \left|\vec{E}_{ext}\right|$$

FísicaTema16

Conductores y Dieléctricos

1. Materiales conductores y dieléctricos.
2. Carga libre, carga ligada, carga neta.
3. Comportamiento de los materiales conductores sometidos a la acción de un campo electrostático.
4. Comportamiento de los materiales dieléctricos sometidos a la acción de un campo electrostático.

1. Materiales conductores y dieléctricos.



"Conducir" la electricidad

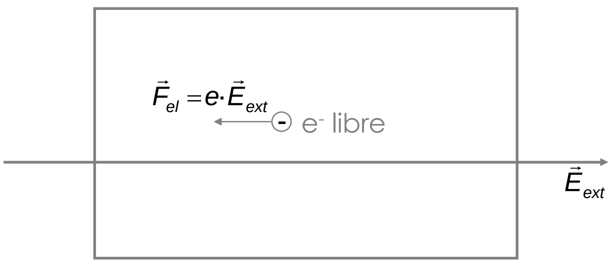
↕

Movimiento de cargas

2. Carga libre, carga ligada, carga neta.

a) CONDUCTORES → carga libre

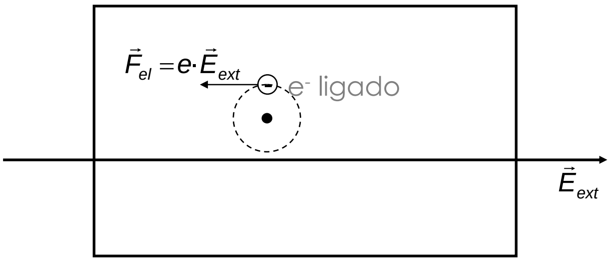
- Disolución electrolítica → los iones se mueven libremente en la disolución
- Metales → electrones libres: pueden moverse libremente en el material



$F_{nucleo-e} \approx 0 \Rightarrow F_{el} > F_{nucleo-e}$

2. Carga libre, carga ligada, carga neta.

B) DIELÉCTRICOS → carga ligada



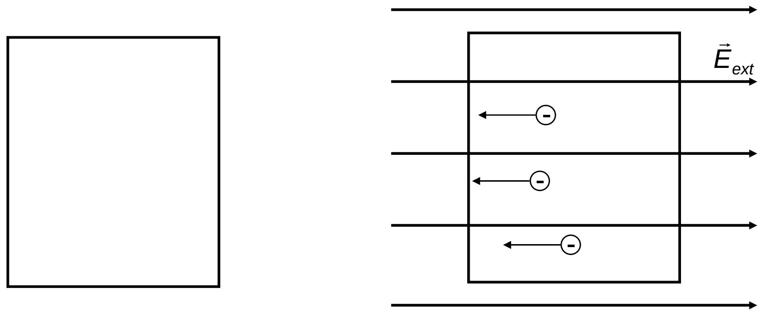
$F_{el} <<< F_{nucleo\ -\ e}$

2. Carga libre, carga ligada, carga neta.

C) OBJETO O CUERPO CARGADO → carga neta

$$n^o\ p \neq n^o\ e$$

3. Comportamiento de los materiales conductores sometidos a la acción de un campo electrostático.

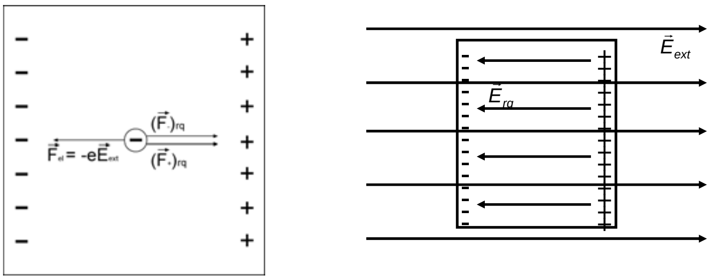


Conductor neutro

Movimiento de los electrones libres hacia la pared "opuesta" del conductor

3. Comportamiento de los materiales conductores sometidos a la acción de un campo electrostático.

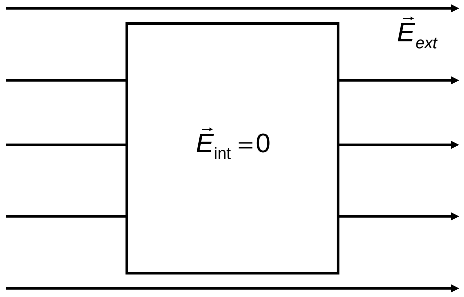
- Debido a $\vec{E}_{ext}$ existe una redistribución de carga en el interior del conductor (electrones en la pared izquierda y huecos en la derecha)
- La redistribución de carga afecta al movimiento de los electrones libres.



- Los electrones de la pared "opuesta", ejercen una fuerza repulsiva sobre los electrones libres
- Los huecos atraen a los electrones libres.

3. Comportamiento de los materiales conductores sometidos a la acción de un campo electrostático.

SITUACIÓN FINAL

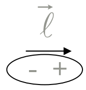


$$\vec{E}_{int} = \vec{E}_{ext} + \vec{E}_{rq} = 0$$

Conductor en equilibrio electrostático.
(no hay movimiento de cargas)

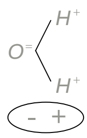
4. Comportamiento de los materiales dieléctricos sometidos a la acción de un campo electrostático.

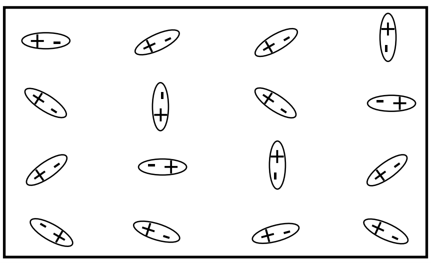
- Dieléctricos polares: sus moléculas constituyen pequeños dipolos.



$$\vec{p}_i = q\vec{\ell}$$

EJEMPLO: molécula de agua



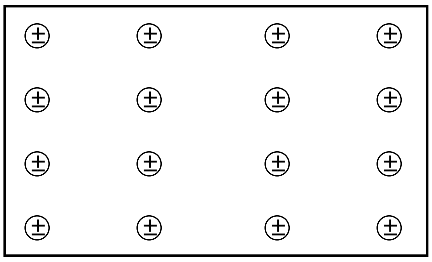


$$\boxed{\begin{array}{l} \vec{p}_i \neq 0 \\ \sum \vec{p}_i = 0 \end{array}}$$

4. Comportamiento de los materiales dieléctricos sometidos a la acción de un campo electroestático.

- Dieléctricos no polares

  EJEMPLO: dióxido de carbono O – C – O ±

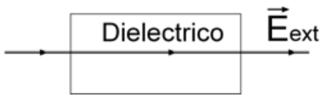


$\vec{p}_i = 0$

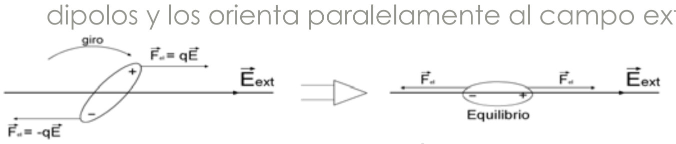
$\sum \vec{p}_i = 0$

4. Comportamiento de los materiales dieléctricos sometidos a la acción de un campo electroestático.

- Si se aplica un campo eléctrico sobre un dieléctrico.



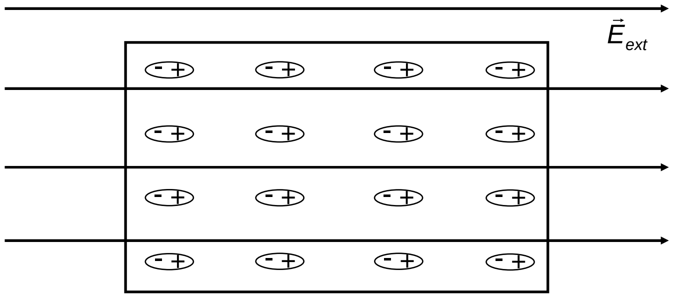
  - **Dieléctrico polar:** El campo actúa sobre cada uno de los dipolos y los orienta paralelamente al campo externo.



  - **Dieléctrico no polar:** Las moléculas se convierten en dipolos orientados paralelamente al campo externo.

4. Comportamiento de los materiales dieléctricos sometidos a la acción de un campo electroestático.

CONCLUSIÓN: al aplicar un campo electroestático sobre un material dieléctrico, la situación final resulta



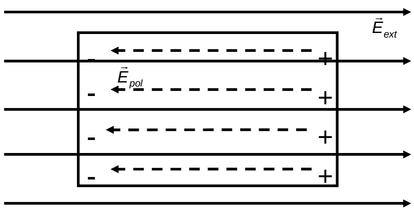
$\vec{P}_i \neq 0$

$\sum \vec{P}_i \neq 0$

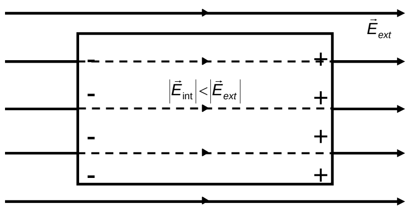
→ El dieléctrico se polariza

Los dipolos crean en el interior del dieléctrico un campo, $\vec{E}_{pol}$, que se superpone a $\vec{E}_{ext}$

4. Comportamiento de los materiales dieléctricos sometidos a la acción de un campo electroestático.



Densidad superficial de carga ligada



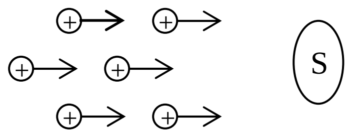
ε_r : constante dieléctrica del medio.

$$\left|\vec{E}_{int}\right| = \frac{\left|\vec{E}_{ext}\right|}{\varepsilon_r} < \left|\vec{E}_{ext}\right|$$

Tema 17: CORRIENTE CONTINUA

1.- La corriente eléctrica. Movimiento de cargas.

- En un conductor por donde circule una corriente eléctrica, se define la intensidad de corriente como la cantidad de carga que atraviesa, por unidad de tiempo, una superficie transversal, *S*. Por convenio, el sentido de circulación de la corriente es la del fluido de carga positiva.



$$\mathrm{I} = \frac{\Delta Q}{\Delta t}$$

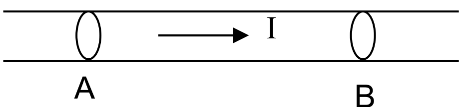
- Si el campo eléctrico que genera la corriente no cambia de sentido y es de módulo aproximadamente constante, la corriente resultante se llama "corriente continua" (CC).

- La unidad de intensidad de corriente eléctrico en el sistema internacional es el "Amperio" (A).

$$1A = \frac{1C}{1s}$$

2.- Ley de Ohm. Resistencia

- La ley de Ohm en el caso particular de un segmento de cable conductor (*AB*) establece que el cociente entre la diferencia de potencial entre los extremos del segmento (V_A - V_B) = V_{AB} y la intensidad de corriente que circula, es una constante que sólo depende de las propiedades del conductor y de las dimensiones del segmento considerado. Esta constante se conoce con el nombre de resistencia eléctrica.



$$\frac{V_{AB}}{\mathrm{I}} = R\,(\Omega)$$

- En la situación esquematizada en la figura, la diferencia de potencial, V_{AB}, resulta siempre positiva. Por este motivo V_{AB} suele llamarse "caída de potencial".

- El símbolo que se utiliza para la resistencia eléctrica es: 

- La resistencia de un cable conductor es proporcional a su longitud, *L*, y inversamente proporcional al área de su sección transversal, *S*,

$$R = \rho \frac{L}{S}$$

donde ρ es la resistividad del material, que depende de su temperatura. La inversa de la resistividad se llama conductividad, $\sigma = 1/\rho$.

3.- Balance energético en los circuidos eléctricos

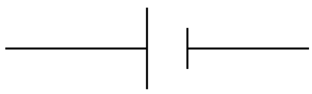
- En una corriente eléctrica, la energía de los portadores se disipa a medida que éstos avanzan por el conductor. La energía disipada se convierte en calor.

- La potencia disipada en un segmento de cable conductor *AB* es:

$$P = \mathrm{I}V_{AB} = \mathrm{I}^2 R \text{ (Ley de Joule)}$$

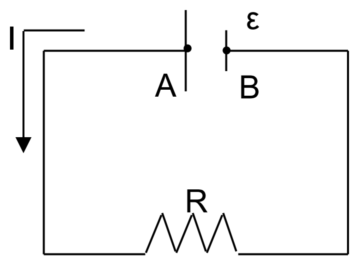
- Un generador de corriente continua es un dispositivo que mantiene una diferencia de potencial constante entre dos puntos fijos que son los “bornes” o puntos de conexión del generador.

- Para representar un generador se utiliza un símbolo que consiste en dos líneas paralelas de longitud diferente. La línea más larga corresponde al punto de potencial más alto, y la más corta al punto de potencial menor.



- Des del punto de vista energético, el generador subministra la energía necesaria para que las cargas circulen por el conductor. La energía subministrada por unidad de carga por un generador se denomina fuerza electromotriz, ε. La fuerza electromotriz se mide en Voltios.

$$\varepsilon = \frac{E_{aportada\ generador}}{\Delta Q} \ (V)$$



- Un circuito eléctrico es un camino conductor cerrado. En la figura se representa un circuito básico, donde *R* simboliza la resistencia eléctrica del circuito. La corriente eléctrica va des del borne del generador con potencial más alto hacia al borne con potencial menor.

- De acuerdo con el principio de conservación de la energía, la energía que aporta un generador a un circuito se ha de igualar a la que se disipa en el mismo. En el caso de un circuito básico, como el de la figura, esto implica que:

$$\varepsilon = \mathrm{I}(R + r_g) = V_{AB} + Ir_g$$

donde r_g es la resistencia interna del generador, que es <u>nula</u> en muchos casos.

FísicaTema17

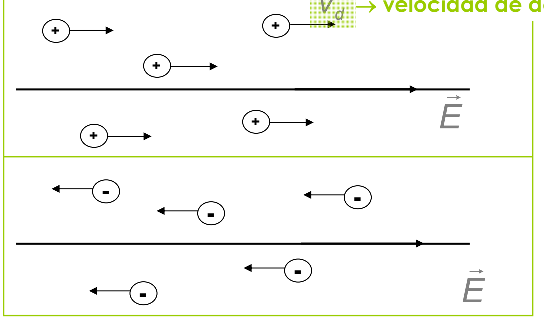
CorrienteContinua Resumen

ÒpticaiOptometria

1. Corriente continua.
2. Descripción de la corriente eléctrica.
3. Diferencia de potencial.
4. Ley de Ohm. Resistencia.
5. Balance energético en los circuitos eléctricos.
   - Ley de Joule
   - Generadores

1. Corriente continua (DC)

➢ material conductor (carga libre)



$\vec{v}_d$ → **velocidad de desplazamiento**

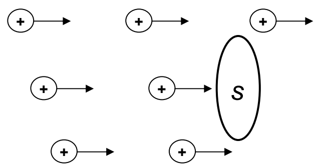
$$\vec{v}_d = \frac{\Delta x_{medio}}{\Delta t} \; // \; \vec{E}$$

$\vec{E}$ ➡ movimiento cargas libres = **corriente eléctrica**

$\vec{E}$ = ctn. ➡ **CORRIENTE CONTINUA**

2. Descripción de la corriente eléctrica.

- **Intensidad de corriente eléctrica: I (escalar)**



$$\mathrm{I} = \frac{\Delta Q}{\Delta t}$$ → Cantidad de carga (en valor absoluto) que atraviesa la superficie **S** por unidad de tiempo.

UNIDADES **SI**: A (Ampère) → $1\mathrm{A} = \frac{1\mathrm{C}}{1\mathrm{s}}$

La **intensidad (I)** es una magnitud física fundamental.

Se demuestra que **I & v_d**

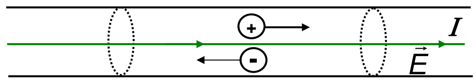
En un cable de Cu (φ = 1mm; **I = 1A**) los electrones libres se desplazan con:

v_d = 0,001 cm/s

2. Descripción de la corriente eléctrica.

- **Sentido de circulación de la corriente**

Convenio: En el caso de un conductor filiforme, la superficie ***S*** queda delimitada por la sección del cable.

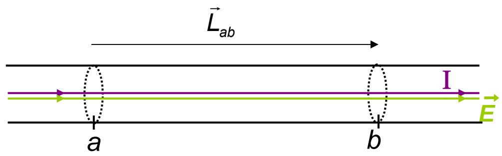


Por "tradición", aunque I sea un escalar, hablaremos siempre del <u>sentido</u> de la corriente eléctrica, que coincide con el sentido en que circularían las cargas libres positivas, es decir con el sentido del vector $\vec{E}$

- **Medida de la intensidad de corriente**

La intensidad de corriente se mide con un Amperímetro.

3. Diferencia de potencial.



$$V_a - V_b \equiv V_{ab} = \vec{E}\cdot\vec{L}_{ab} = E{\cdot}L_{ab} > 0 \Rightarrow V_a > V_b$$

$$E \neq 0 \Leftrightarrow V_{AB} \neq 0$$

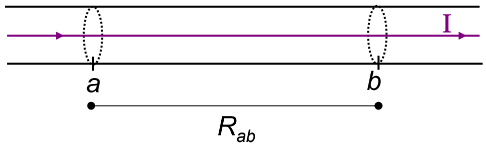
$$E = 0 \Leftrightarrow V_{AB} = 0$$

- **Medida de la diferencia de potenial**

La diferencia de potencial se mide con un voltímetro.

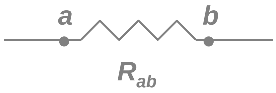
4. Ley de Ohm. Resistencia eléctrica.

- Ley de Ohm en el caso particular de un conductor filiforme



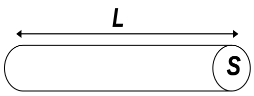
Ley de Ohm: $\dfrac{V_{ab}}{I} = ctn = R_{ab} \longrightarrow$ $V_{ab}\uparrow\downarrow \Leftrightarrow I\uparrow\downarrow$ Magnitudes proporcionales

- Símbolo gráfico de la resistencia



4. Ley de Ohm. Resistencia eléctrica.

- Cálculo de la resistencia



σ: **conductividad** del material
$\rho = (1/\sigma)$: **resistividad** del material

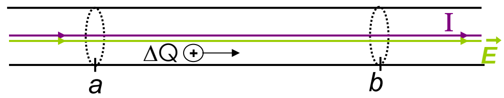
R depende de la **estructura** interna y de las **dimensiones** del material conductor comprendido entre los puntos *a* y *b*.

$$R = \frac{1}{\sigma}\cdot\frac{L}{S} = \rho\cdot\frac{L}{S}$$

- UNIDADES de la resistencia eléctrica:

$$(SI) \rightarrow \Omega\ (ohm);\ 1\Omega = \frac{1V}{1A}$$

5. Balance energético en los circuitos eléctricos.



- **Ley de Joule: disipación de energía**

La **energía mecánica** de las cargas que circulan por un conductor **disminuye** (se disipa) a lo largo de su recorrido. La energía disipada **se convierte en calor** (efecto Joule).

$$E_{(mecánica)} = \varepsilon_c + U^{elec}$$

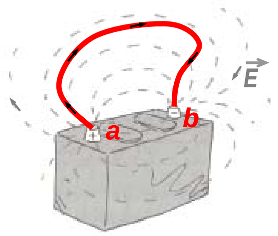
- $v_d \approx$ ctn. (experimental) $\Rightarrow (\varepsilon_c)_a \approx (\varepsilon_c)_b$
- $(U^{elec} = \Delta Q \cdot V)$ y $(V_a > V_b) \Rightarrow U_a^{elec} > U_b^{elec}$

$\Big\} \; E_a > E_b$

$$\frac{E_a - E_b}{\Delta t} = P_{dis} = V_{ab}\mathrm{I} = \mathrm{I}^2 R \rightarrow \textbf{Ley de Joule}$$

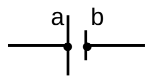
5. Balance energético en los circuitos eléctricos.

- **Generadores**



- Los "polos" positivo y negativo de la batería generan un campo eléctrico a su alrededor.
- Existe una componente del campo diferente de cero paralela al recorrido del conductor i sentido ***a*** $\rightarrow$ ***b*** en todos sus puntos $\Leftrightarrow V_{ab} \approx E \cdot \ell_{ab} > 0$.

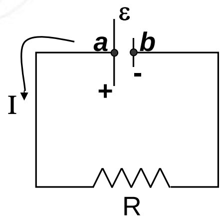
Los generadores generan un ***campo eléctrico*** *en el interior del conductor o, lo que es* ***equivalente***, *una* ***diferencia de potencial*** *entre sus extremos.*

Símbolo: 

$V_a > V_b$ → segmento mayor

5. Balance energético en los circuitos eléctricos.

➢ **Circuito base**



➢ **Fuerza electromotriz del generador:** Energía que aporta el generador por unidad de carga.

$$\varepsilon = \frac{E_{aportada\ \ generador}}{\Delta Q} \Rightarrow (J/C \rightarrow Volt)$$

➢ **Principio de conservación de la energía**

$$E_{aportada\ \ generador} = E_{disipada} \Rightarrow \varepsilon = V_{ab} + \frac{E_{disipada\ \ gen.}}{\Delta Q} = IR + Ir$$

Tema 18: EL CAMPO MAGNÈTICO

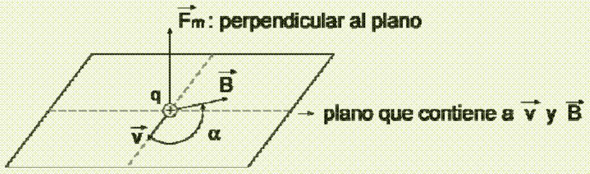
1.- Introducción

- Se observa experimentalmente que las cargas eléctricas en movimiento interaccionan entre ellas a través de la fuerza magnética. Dado que las corrientes eléctricas implican cargas en movimiento, también se ejercen fuerzas magnéticas de interacción entre ellas. Los imanes también ejercen fuerzas magnéticas de interacción entre ellas.

- No existe ninguna ley física que relacione directamente el valor de las cargas y/o sus velocidades con las fuerzas magnéticas que se ejercen entre ellas. Esta fuerza solo puede describirse mediante el concepto de campo magnético.

2.- Acción de un campo magnético sobre una carga en movimiento: fuerza de Lorenz. Definición de campo magnético.

- Cuando una carga q se mueve con velocidad v en presencia de un campo magnético B, experimenta una fuerza



$$\vec{F}_m = q\vec{v} \wedge \vec{B} = \begin{cases} \text{Módulo: } qvB \sin\alpha \\ \text{Dirección: perpendicular al plano } (\vec{v},\vec{B}) \\ \text{Sentido: regla del producto vectorial} \end{cases}$$

- La unidad SI para el campo magnético es el telsa (T). Otra unidad de uso frecuente es el gauss (G).

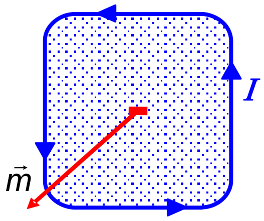
$$1T = \frac{1N}{1A \cdot 1m} \qquad 1\text{ T} = 10^4\text{ G}$$

3.- Acción de un campo magnético sobre un elemento de corriente.

- La fuerza magnética que actúa sobre un elemento de corriente situado en una zona del espacio donde existe un campo magnético, viene dada por

$$d\vec{F}_m = \mathrm{I} d\vec{\ell} \times \vec{B}$$

4.- Movimiento magnético de una espira. Acción de un campo magnético sobre una espira, una bobina y un imán. Movimiento magnético de un imán



- Una espira es un circuito de corriente cerrado y contenido en un plano. La espira es el perímetro de una superficie plana S.

- El momento magnético asociado a la espira es un vector que se define como

$$\vec{m} = \begin{cases} \text{Módulo: } \mathrm{I} \cdot S \ (A \cdot m^2) \\ \text{Dirección: perpendicular al plano de la espira} \\ \text{Sentido: relacionado con el sentido de circulación de la corriente} \\ \quad \text{de acuerdo con la “regla de la mano derecha”} \end{cases}$$

- Las fuerzas magnéticas que experimenta una espira situada en una zona del espacio donde existe un campo magnético, la hacen girar hasta que su momento magnético es paralelo al campo. A partir de entonces, la espira se mantiene en equilibrio. Pasa lo mismo en el caso de un imán y de una bobina.

- En un imán natural, los electrones de los átomos o moléculas que lo constituyen pueden considerarse pequeñas espiras de corriente, con sus momentos magnéticos orientados paralelamente. El momento magnético del imán es la resultante de sumar los momentos de las espiras "electrónicas".

5.- Polos norte y sud magnéticos

- La tierra genera un campo magnético, cuyas líneas de campo están dirigidas des del Sur hacia al Norte. Por ello, cualquier imán longitudinal que se pueda mover libremente sobre la superficie de la tierra, se orienta en dirección Sur-Norte. La parte del imán que apunta hacia el norte se denomina "polo norte" y la que apunta hacia al sur se denomina "polo sur".

6.- Fuentes de campo magnético. Ley de Biot y Savart

- El campo magnético $d\vec{B}$ creado por un elemento de corriente $\mathrm{I}d\vec{\ell}$ en un punto, *P,* separado una distancia $\vec{r}$ respecto al elemento de corriente, viene dada por la ley de Biot y Savart.

$$d\vec{B} = \frac{\mu_0}{4\pi} \cdot \frac{\mathrm{I}d\vec{\ell} \wedge \vec{u}_r}{r^2} = \begin{cases} \dfrac{\mu_0}{4\pi}\mathrm{I}\dfrac{d\ell \sin\alpha}{r^2} \\ \perp \text{ pla } (d\vec{\ell},\vec{r}\,) \\ \text{regla producte vectorial} \end{cases}$$

donde $\vec{u}_r$ es un vector unitario paralelo a $\vec{r}$, y μ_0 es una constante llamada permeabilidad magnética del vacío, de magnitud $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}\, N/A^2$.

  - El campo magnético creado por un circuito de corriente se calcula considerando el circuito como una sucesión de elementos de corriente. Entonces, si d*Bi* es el campo que genera el elemento de corriente "*i*",

$$\vec{B}_{circuito} = \sum d\vec{B}i = \int_{circuïto} \left[\frac{\mu_0}{4\pi} \frac{\mathrm{I}d\vec{\ell} \wedge \vec{u}_r}{r^2} \right]$$

7.- Campo magnético creado por una espira, una bobina, un imán, un hilo rectilíneo e indefinido y una carga en movimiento.

- El campo magnético creado por un <u>*conductor rectilíneo*</u> portador de corriente en un punto situado a una distancia perpendicular **a** (pequeña comparada con la longitud del hilo) es:

$$B = \mu_0 \frac{I}{2\pi a}$$

La dirección y el sentido de *B* son tales que las líneas de campo envuelven el hilo y en su sentido es el que indican los dedos de la mano derecha cuando el pulgar está en sentido de la corriente.

- El módulo del campo magnético creado por una *espira circular* de corriente en los puntos de su eje viene dada por:

$$B = \frac{\mu_0}{2} \frac{\mathrm{I} R^2}{(R^2 + x^2)^{3/2}}$$

donde *R* es el radio de la espira y *x* es la distancia des del centro de la espira hasta el punto. La dirección de B es paralela al eje. El pulgar de la mano derecha apunta en el sentido del campo cuando los otros dedos se dirigen según el sentido de la corriente de la espira.

8.- Atracción y repulsión magnéticas

- La fuerza magnética de interacción entre imanes es repulsiva entre dos polos Norte o dos polos Sur, y atractiva entre polo Norte y polo Sur.

- La fuerza magnética de interacción entre corrientes eléctricas es repulsiva si las dos corrientes circulan en sentidos contrarios, y atractiva si circulan en el mismo sentido.

Física Extracto Tema 18

El Campo Magnético

Òptica i Optometria

1. El campo magnético. Introducción
2. Acción de un campo magnético sobre una carga en movimiento: fuerza de Lorentz.
3. Acción de un campo magnético sobre un elemento de corriente.

Òptica i Optometria

1. El campo magnético. Introducción

- Se observa experimentalmente que:
  - ❖ Los ***imanes*** interactúan entre sí por medio de fuerzas magnéticas.
  - ❖ Las ***corrientes eléctricas*** interactúan entre sí por medio de fuerzas magnéticas
  - ❖ Las ***cargas en movimiento*** interactúan entre sí por medio de fuerzas magnéticas (distintas a la fuerza de Coulomb).
  - ❖ Ídem Carga en movimiento ⟷ corriente

    Corriente ⟷ Imán

    Carga en movimiento ⟷ Imán

1. El campo magnético. Introducción

- Estas fuerzas de interacción pueden describirse mediante la existencia de un campo magnético: $\vec{B}$

  (analogía caso electroestático)

1. El campo magnético. Introducción

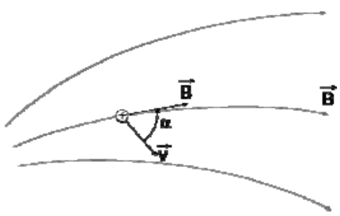
- El campo magnético

$\vec{B}(x, y, z, t)$: Campo vectorial

Actúa sobre:
•Imán;
• Corriente eléctrica I;
• q en movimiento.

Generado por:
•Imán;
• Corriente eléctrica I;
• q en movimiento.

2. Acción de un campo magnético sobre una carga en movimiento: fuerza de Lorentz



$$\vec{F}_m = q\vec{v} \wedge \vec{B}$$

Módulo: $qvB\sin\alpha$

Dirección: Perpendicular al plano $(\vec{v}, \vec{B})$

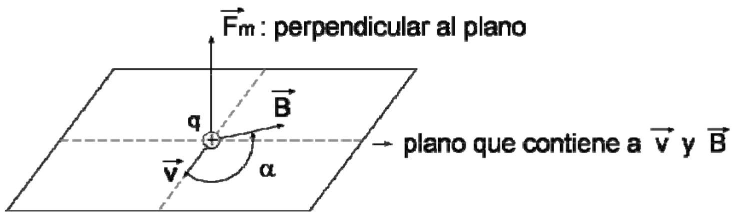
Sentido: Regla del producto vectorial

El que indica el dedo pulgar de la mano derecha cuando los demás dedos apuntan desde $\vec{v}$ hasta $\vec{B}$, tal como indica la figura

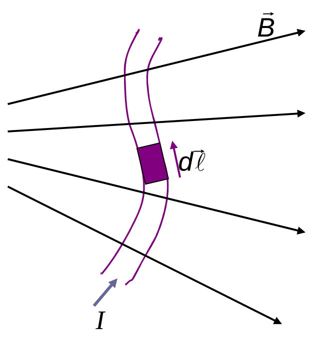
$\vec{v}$ y $\vec{B}$ en el plano del dibujo → $\vec{F}_m$ perpendicular al plano, "hacia nosotros"

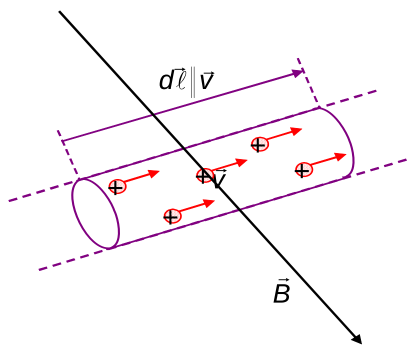
2. Acción de un campo magnético sobre una carga en movimiento: fuerza de Lorentz

(Cambio de perspectiva)



3. Acción de un campo magnético sobre un elemento de corriente.





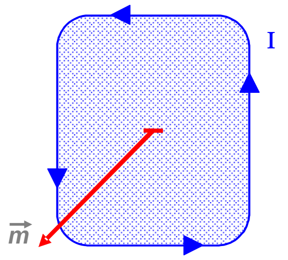
$\boxed{I d\vec{\ell}}$ $\Big\{$ elemento de corriente

$\vec{B} \Rightarrow \vec{F}_m$ sobre cada portador

$$\left(\vec{F}_m\right)_{\substack{elemento\\de\,corriente}} = \sum \left(\vec{F}_m\right)_{portador} = I d\vec{\ell} \wedge \vec{B}$$

4. Acción de un campo magnético sobre una corriente

b) ESPIRA: CIRCUITO CERRADO



$\vec{m}$: Momento magnético de la espira

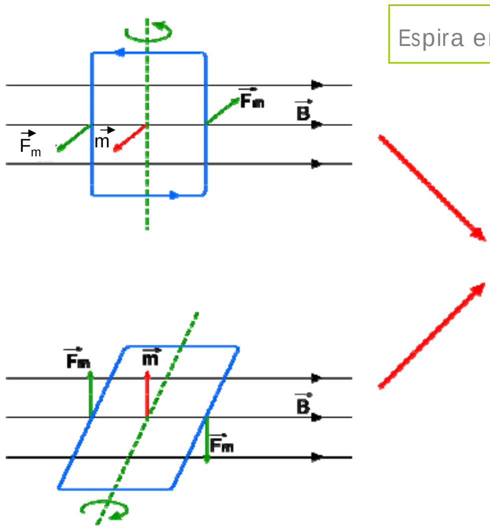
$\vec{m}$
- $I \cdot S$ (Am^2)
- ⊥ plano espira
- Depende del sentido de circulación de la corriente I.

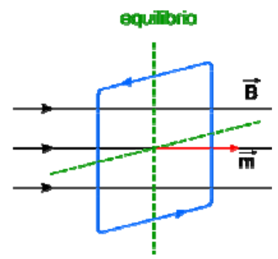
Si I circula en sentido antihorario, entonces $\vec{m}$ apunta hacia fuera (hacia nosotros)

Si I circula en sentido horario, entonces $\vec{m}$ apunta hacia dentro

4. Acción de un campo magnético sobre una corriente

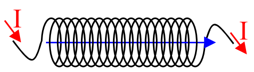
Espira en un $\vec{B} \Rightarrow$ giro hasta $\vec{m} \parallel \vec{B}$





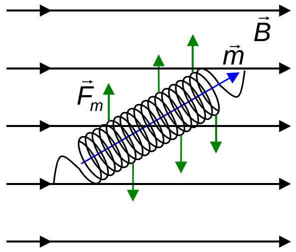
4. Acción de un campo magnético sobre una corriente

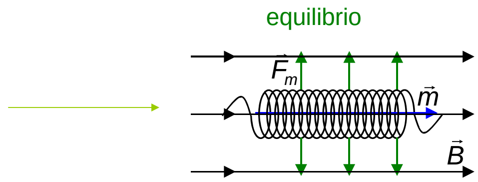
c) BOBINA O SELENOIDE



Momento magnético de la bobina:

$m = nIS$

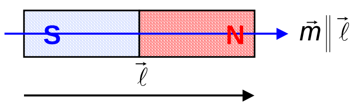


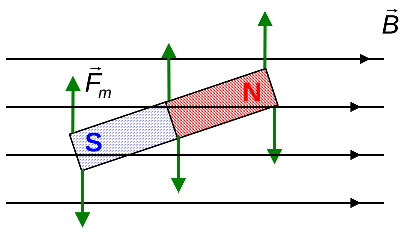


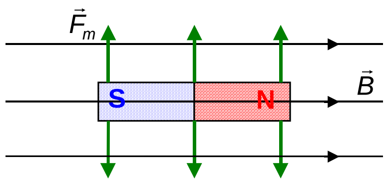
4. Acción de un campo magnético sobre una corriente

d) IMAN

Momento magnético del imán







Lección 19: ECUACIONES DE MAXWELL Y ONDAS ELECTROMAGNÉTICAS

1.- Ecuaciones de Maxwell.

- Las ecuaciones de Maxwell tienen una gran importancia teórica y conceptual. Están basadas en un conjunto de leyes experimentales, algunas de la cuales se han estudiado en los capítulos anteriores. Constituyen la base del electromagnetismo clásico.

- En las ecuaciones de Maxwell se relacionan el campo magnético y el campo eléctrico con sus correspondientes fuentes.

- Los enunciados de las Leyes de Maxwell son:

  - 1ª Ecuación de Maxwell (teorema de Gauss): relaciona el campo eléctrico con sus fuentes, que son las cargas eléctricas. Su base experimental es la ley de Coloumb. Este teorema implica que las líneas del campo eléctrico siempre parten de una carga positiva y mueren o van a parar a una carga negativa.

$$\oint \vec{E}\cdot d\vec{s} = \frac{Q_{\text{int}}}{\varepsilon_0}$$

  - 2ªEcuación de Maxwell: el flujo del campo magnético a través de una superficie cerrada es siempre 0, lo que quiere decir que las líneas del campo magnético se cierran sobre sí mismas.

$$\oint \vec{B}\cdot d\vec{s} = 0$$

  - 3ªEcuación de Maxwell (Ley de Faraday): describe una segunda fuente de campo eléctrico, y esta segunda fuente es un campo magnético que varía con el tiempo.

$$\int_C \vec{E}\cdot d\vec{\ell} = -\frac{d}{dt}\int_S \vec{B}\cdot d\vec{s}$$

  - 4ªLey de Maxwell (Ley de Maxwell-Ampere): relaciona el campo magnético con sus fuentes, que son por un lado las corrientes eléctricas (incluyendo el caso de cargas eléctricas en movimiento y los imanes), y por otro lado un campo eléctrico que cambia con el tiempo.

$$\int_C \vec{B}\cdot d\vec{\ell} = \mu_0\left(\mathrm{I} + \varepsilon_0 \frac{d}{dt}\int_S \vec{E}\cdot d\vec{s}\right)$$

2.- Ondas electromagnéticas. Espectro electromagnético

- En el caso de las ondas electromagnéticas planas y armónicas la perturbación que se propaga es doble, ya que se propagan conjuntamente un campo eléctrico y un campo magnético oscilantes.

- La formulación matemática que describe estas ondas es análoga a la ya estudiada para las ondas armónicas mecánicas.

$$\vec{E}(x,t) = \vec{E}_0 \sin(kx - wt)$$
$$\vec{B}(x,t) = \vec{B}_0 \sin(kx - wt)$$

- Las leyes de Maxwell predicen que los dos campos no son independientes, ya que un campo eléctrico que cambia con el tiempo es una fuente de campo magnético y un campo magnético que cambia con el tiempo es una fuente de campo eléctrico. Por lo tanto los campos que se propagan se influyen uno a otro.

- Las ondas correspondientes al campo eléctrico y al campo magnético oscilan en fase.

- Los dos campos son perpendiculares a la dirección de propagación y perpendiculares entre sí. Si la dirección *X* es la de propagación, entonces el campo eléctrico es paralelo a *Y*, y el campo magnético a *Z*.

- Las ecuaciones de Maxwel predicen que las ondas electromagnéticas se propagan a la velocidad de la luz (C = $3 \cdot 10^8$ m/s).

- Existen ondas electromagnéticas para cualquier valor de la frecuencia y la longitud de onda ($\lambda \cdot \nu = C$). La aplicación o uso que se da a las ondas electromagnéticas varía en función de cuáles sean su frecuencia y su longitud de onda.

- El ojo humano detecta solo las ondas electromagnéticas cuyas longitudes de onda van desde 400 nm, que corresponde al azul a los 700 nm, que corresponden al rojo. Por este motivo, la radiación electromagnética con longitudes de onda comprendidas entre estos valores se la denomina “visible”.

- La propagación de las ondas electromagnéticas implica transporte de energía y de cantidad de movimiento desde la fuente a los puntos del espacio por donde se propaga la onda.

- El promedio temporal de la intensidad en cada punto es proporcional al cuadrado de la amplitud del campo eléctrico.

$$\mathrm{I} = \left\langle S \right\rangle_T = \frac{C\varepsilon_0}{2} E_0^2$$

FísicaTema19

Ecuaciones de Maxwell y ondas electromagnéticas

ÒpticaiOptometria

1. Ecuaciones de Maxwell.

- Todas las leyes experimentales del electromagnetismo pueden sintetizarse en cuatro ecuaciones, conocidas como leyes de Maxwell.

  Ley de Coulomb
  Teorema de Gauss
  Ley de Biot y Savart
  Ley de Ampere
  Ley de Faraday

- Las ecuaciones de Maxwell relacionan los campos $\vec{E}$ y $\vec{B}$ con sus fuentes (cargas eléctricas, corrientes)
- Las ecuaciones de Maxwell constituyen la base del electromagnetismo clásico (Newton ↔ mecánica clásica)
- En base a sus ecuaciones, Maxwell predijo la existencia de las ondas electromagnéticas y también que la luz es una onda electromagnética.

1. Ecuaciones de Maxwell.

ENUNCIADOS

1ª Ecuación de Maxwell (Teorema de Gauss)

$$\oint \vec{E} \cdot d\vec{s} = \frac{Q_{int}}{\varepsilon_0}$$ ⟺ Las líneas de $\vec{E}$ "nacen" en Q+ y "mueren" en Q-

- Relaciona $\vec{E}$ con sus fuentes (Q)
- Es una consecuencia de la ley experimental de Coulomb

1. Ecuaciones de Maxwell.

2ª Ecuación de Maxwell

$$\oint \vec{B} \cdot d\vec{s} = 0$$

Las líneas de campo magnético son siempre cerradas sobre si mismas

3ª Ecuación de Maxwell (ley de Faraday)

$$\int_C \vec{E} \cdot d\vec{\ell} = -\frac{d}{dt} \int_S \vec{B} \cdot d\vec{s}$$

$\vec{B}(t)$: también es una "fuente" de campo eléctrico

1. Ecuaciones de Maxwell.

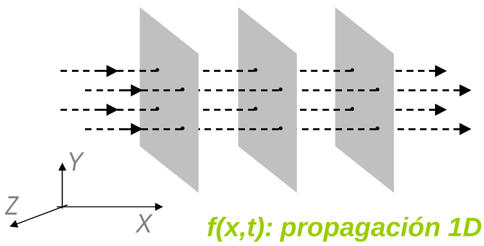
4ª Ecuación de Maxwell → ***Ley de Maxwell - Ampere***

$$\int_C \vec{B}\cdot d\vec{\ell} = \mu_0 \left(\mathrm{I} + \varepsilon_0 \frac{d}{dt} \int_S \vec{E}\cdot d\vec{s} \right)$$

- Relaciona $\vec{\mathrm{B}}$ con sus fuentes $\begin{cases} I \\ \vec{E}(t) \end{cases}$

2. Ondas electromagnéticas. Espectro electromagnético.

- Ondas electromagnéticas planas y armónicas.
  - *Onda plana*



f(x,t): propagación 1D

x : dirección de propagación

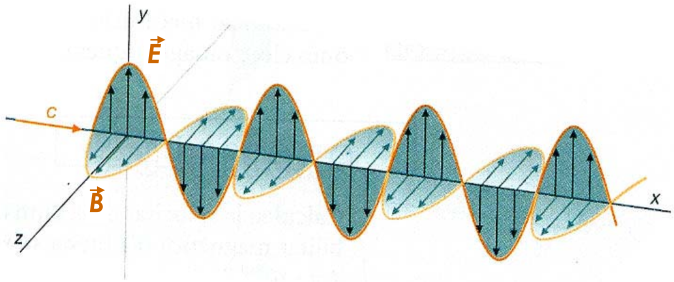
2. Ondas electromagnéticas. Espectro electromagnético.

- Ondas electromagnéticas planas y armónicas.
  - La perturbación que se propaga es doble: un campo eléctrico, $\vec{E}$, y un campo magnético, $\vec{B}$.
  - **f(x,t)** $\rightarrow$ $\boxed{\begin{array}{l}\vec{E}(x,t)=\vec{E}_0\sin(kx-wt)\\ \vec{B}(x,t)=\vec{B}_0\sin(kx-wt)\end{array}}$ *NO independientes*
  - Las ecuaciones de Maxwell permiten demostrar que:
    - $\vec{E}$ y $\vec{B}$ están en fase. Módulos: $\left|\vec{E}_0\right|=C\cdot\left|\vec{B}_0\right|$
    - $\vec{E}$ y $\vec{B}$ son ambos perpendiculares a la dirección de propagación y, además, perpendiculares entre sí.

$$\vec{v}=C\,\vec{i} \qquad \begin{array}{l}\vec{E}(x,t)=[E_0\sin(kx-wt)]\vec{j} \quad \| \; Y\\ \vec{B}(x,t)=[B_0\sin(kx-wt)]\vec{k} \quad \| \; Z\end{array}$$

2. Ondas electromagnéticas. Espectro electromagnético.

- Ondas electromagnéticas planas y armónicas.
  - *Onda transversal*



2. Ondas electromagnéticas. Espectro electromagnético.

- Las ecuaciones de Maxwell predicen la existencia de ondas electromagnéticas con una velocidad de propagación.

  $C = 3 \cdot 10^8$ m/s

- Existen ondas electromagnéticas para todos los valores posibles de la frecuencia, ν, y la longitud de onda, λ.
- Para una misma onda electromagnética

  $\lambda \cdot \nu = C = 3 \cdot 10^8$ m/s

- El valor de ν (o de λ) determina la aplicación para la que se utiliza una onda electromagnética.

ÒpticaiOptometria 24/27

2. Ondas electromagnéticas. Espectro electromagnético.

EL ESPECTRO ELECTROMAGNETICO

- Rayos gamma $\begin{cases} \nu \approx 10^{19}, 10^{20} \ldots \text{ Hz} \\ \lambda \approx 10^{-11}, 10^{-12} \ldots \text{ m} \end{cases}$
- Rayos X $\begin{cases} \nu \approx [10^{16} \rightarrow 10^{20}] \text{Hz} \\ \lambda \approx [10^{8} \rightarrow 10^{-12}] \text{m} \end{cases}$
- Radiación UV $\begin{cases} \nu \approx 10^{16}, 10^{17} \text{ Hz} \\ \lambda \approx 10^{-7}, 10^{-8} \text{ m} \end{cases}$
- Radiación visible $\begin{cases} 10^{14} > \nu > 10^{15} \text{ Hz} \\ \lambda \approx 10^{-6} \text{ m} \end{cases}$

ÒpticaiOptometria 25/27

2. Ondas electromagnéticas. Espectro electromagnético.

- Radiación Infrarroja $\begin{cases} \nu \approx 10^{13}, 10^{14}\ \text{Hz} \\ \lambda \approx 10^{-4}, 10^{-5}\ \text{m} \end{cases}$
- Microondas $\begin{cases} \nu \approx 10^{11}, 10^{12}\ \text{Hz} \\ \lambda \approx 10^{-2}, 10^{-3}\ \text{m} \end{cases}$
- TV y radio FM $\begin{cases} \nu \approx 10^{8}\ \text{Hz} \\ 1 \leq \lambda \leq 10\ \text{m} \end{cases}$
- Ondas de radio AM $\begin{cases} 10^{7} > \nu > 10^{6}\ \text{Hz} \\ \lambda \approx 10^{2}\ \text{m} \end{cases}$
- Ondas de radio largas $\begin{cases} \nu \approx 10^{5}, 10^{4}\ldots\ \text{Hz} \\ \lambda \approx 10^{3}, 10^{4}\ldots\ \text{m} \end{cases}$

ÒpticaiOptometria 26/27

2. Ondas electromagnéticas. Espectro electromagnético.

Ondas electromagnéticas "visibles".

$\nu = 7'5 \cdot 10^{14}$ $4{,}3 \cdot 10^{14}$ Hz

$\lambda = 400$ nm 500 600 700 nm

Espectro continuo

ÒpticaiOptometria 27/27

2. Ondas electromagnéticas. Espectro electromagnético.

- **Transporte de energía en las ondas electromagnéticas.**
  - Propagación ⇒ transporte de energía (eléctrica y magnética) y de cantidad de movimiento.
  - La energía en cada punto se calcula a partir de la densidad de energía "electromagnética" (J/m^3) almacenada en el punto.
  - El vector de Pointing relaciona la intensidad instantánea transmitida con los vectores campo eléctrico y campo magnético.

$$\vec{S}=\frac{\vec{E}\wedge\vec{B}}{\mu_0}=\varepsilon_0 C^2\cdot\left(\vec{E}\wedge\vec{B}\right)$$ (W/m^2)

  - A partir del vector de Pointing se demuestra que el promedio temporal de la intensidad en cada punto es proporcional al cuadrado de la amplitud del campo eléctrico.

$$\mathrm{I}=\langle S\rangle_T=\frac{C\varepsilon_0}{2}E_0^2$$

UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE CATALUNYA

FÍSICA

Contenidos

Módulo 1: MECÁNICA. CONCEPTOS BÁSICOS

Objetivos específicos

Al acabar el módulo el estudiante será capaz de …

- Aplicar las leyes de Newton para resolver problemas de mecánica sencillos
- Aplicar el principio de conservación de la energía para resolver problemas de mecánica sencillos

Temario

1. VECTORES (1.-Magnitudes escalares y vectoriales. 2.-Vector. Álgebra vectorial. 3.-Vectores unitarios. Componentes cartesianas. 4. Producto escalar de dos vectores. 5. Producto vectorial de dos vectores. 6. Análisis vectorial.)

2. CINEMÁTICA (1. Movimiento rectilíneo. Sistema de referencia. 2. Velocidad. 3. Aceleración. 4. Movimiento rectilíneo con aceleración constante. 5. Movimiento en dos y tres dimensiones. Sistema de referencia. 6. Movimiento circular con velocidad de módulo constante. Velocidad angular. Aceleración centrípeta.)

3. LAS LEYES DE NEWTON (1. Principios fundamentales de la dinámica. Las leyes de Newton. 2.-Las fuerzas de la naturaleza.)

4. DINÁMICA DE LA PARTÍCULA (1. Trabajo. Unidades. 2. Energía cinética. 3. Fuerzas conservativas. Energía potencial. 4. Conservación de la energía mecánica. 5. Potencia. Unidades.

Módulo 2: MECÁNICA DE SÓLIDOS y FLUIDOS.

Objetivos específicos

Al finalizar el módulo el estudiante será capaz de …

- Describir el concepto de densidad de una sustancia.
- Calcular mediante la ley de Hooke las deformaciones producidas sobre un cuerpo cuando se le aplica una fuerza, en algunos casos especialmente interesantes.
- Describir los conceptos de presión en el interior de un fluido, caudal de una corriente de fluido y viscosidad de los fluidos.
- Aplicar las leyes fundamentales de la estática y la dinámica de los fluidos ideales y viscosos en régimen laminar y estacionario a problemas y situaciones sencillas que involucren fluidos en reposo y/o en movimiento.
- Describir cualitativamente el papel que juegan las fuerzas de cohesión en líquidos, y las de adhesión entre sólidos y líquidos en casos relevantes en el marco de la Optometría.

Temario

5. PROPIEDADES ELÁSTICAS DE LOS MATERIALES (1. Cuerpos elásticos. 2. Elasticidad por tracción o compresión. 3. Compresión uniforme.)

6. ESTÁTICA DE FLUIDOS (1. Introducción. Generalidades sobre fluidos. 2. Presión en el interior de un fluido. Principio de Pascal. 3. Estática de fluidos en el campo de la gravedad. Presión atmosférica. 4. Unidades de presión. 5. Principio de Arquímedes.)

7. DINÁMICA DE LOS FLUIDOS IDEALES (1. Descripción del movimiento de un fluido ideal. Líneas de corriente. 2. Regímenes de flujo. El fluido ideal. 3. Caudal. 4. Ecuación de continuidad. 5. Teorema de Bernouilli. Interpretación energética. 6. Aplicaciones del teorema de Bernouilli. Efecto Venturi. Teorema de Torricelli.

8. DINÁMICA DE LOS FLUIDOS VISCOSOS (1. El movimiento de los fluidos reales. Viscosidad. 2. Flujo laminar de un fluido viscoso por un tubo. Ley de Hagen Poiseuille. Pérdida de carga. 3. Ley de Stokes. Sedimentación.)

9. FORCES DE COHESIÓ EN LÍQUIDS (1. Fuerzas intermoleculares en líquidos. Cohesión. 2. Tensión superficial. 3. Contacto entre sólido y líquido. Adhesión.)

Módulo 3: OSCILACIONES y ONDAS.

Objectivos específicos

Al finalizar el módulo el estudiante será capaz de …

- Aplicar las funciones armónicas a la descripción del movimiento armónico simple.
- Aplicar las ecuaciones del movimiento armónico simple para resolver problemas que involucren el movimiento de un cuerpo unido al extremo de un muelle o impulsado por un muelle.
- Determinar la velocidad de propagación de las ondas.
- Aplicar las funciones armónicas a la descripción de las ondas que se propagan en un medio unidimensional.
- Utilizar correctamente el lenguaje asociado a la descripción de las ondas.
- Representar gráficamente la función de onda en el caso unidimensional en un punto concreto del espacio o en un instante de tiempo determinado.
- Conocer el resultado de la interferencia de dos ondas unidimensionales que viajan en el mismo sentido, con las mismas amplitud, frecuencia y longitud de onda para utilizarlo en la resolución de problemas de interferencia sencillos.
- Describir las ondas estacionarias en una corda fijada pro los dos extremos y resolver problemas básicos sobre esta situación física.
- Determinar cualitativamente la intensidad asociada a una onda en casos prácticos.

Temario

10. OSCILACIONES (1. Movimiento armónico simple. Ecuaciones de movimiento 2. Oscilación de una masa unida a un muelle. Energía potencial elástica 3. Oscilaciones amortiguadas.)

11. DESCRIPCIÓN DEL MOVIMIENTO ONDULATORIO EN UNA DIMENSIÓN (1. Pulsos de ondas. Pulsos longitudinales y pulsos transversales. 2. Función de onda. 3. Velocidad de propagación de un pulso en una cuerda. 4. Reflexión y transmisión de pulsos. 5. Ondas armónicas en una dimensión. 6. Parámetros que caracterizan una onda armónica. 7. Energía y intensidad de una onda harmónica. Absorción. 8. La ecuación de onda. 9.-Ondas sonoras.)

12. SUPERPOSICIÓN DE ONDAS EN UNA DIMENSIÓN (1. Interferencia. Superposición de pulsos. 2. Superposición de dos ondas armónicas. 3. Funciones de onda estacionarias. 4. Ondas estacionarias en una corda fijada por los dos extremos.

13. MOVIMIENTO ONDULATORIO EN DOS Y TRES DIMENSIONES (1. Ondas 2D y ondas 3D. 2. Frente de onda. Rayo. 3. Ondas planas, circulares y esféricas. 4. Propagación de la energía asociada a las ondas 2D y 3D. Intensidad. 5. El Principio de Huygens. Reflexión refracción y difracción. 6. Efecto Doppler.)

Módul 4: ELECTROMAGNETISMO.

Objetivos específicos

Al finalizar el módulo el estudiante será capaz de …

- Calcular la fuerza de interacción eléctrica entre dos o mas cuerpos con carga eléctrica.

FÍSICA

- Calcular el campo y el potencial eléctricos generados por diversas distribuciones de carga en los puntos del espacio circundante.
- Describir la interacción del campo electrostático con los materiales conductores y los dieléctricos.
- Calcular la fuerza magnética que experimenta una carga en movimiento o un elemento de corriente situados en una zona del espacio donde exista un campo magnético.
- Calcular el campo magnético generado por diversas distribuciones de corriente eléctrica.
- Saber distinguir en que casos aparece una corriente inducida en una espira conductora, y en cuales no.
- Describir formalmente las ondas electromagnéticas planas y armónicas.

Temario

14. INTRODUCCIÓN MATEMÁTICA (1. Campos escalares y campos vectoriales. 2. Flujo de un campo vectorial. Integral de superficie. 3. Circulación de un campo vectorial. Integral de línea.)

15. EL CAMPO ELECTROSTÁTICO (1. Carga eléctrica. Estructura eléctrica de la materia. 2. Ley de Coulomb. Unidades de carga. 3. El campo eléctrico. 4. Líneas de campo. 5. Energía potencial electrostática. 6. Potencial eléctrico.)

16. CONDUCTORES Y DIELÉCTRICOS (1.-Materiales conductores y dieléctricos. 2.-Carga libre, carga ligada y carga neta. 3.-Comportamiento de materiales conductores sometidos a la acción de un campo electrostático. 4.-Comportamiento de materiales dieléctricos sometidos a la acción de un campo electrostático. Polarización del dieléctrico. Constante dieléctrica.)

17. CORRIENTE CONTINUA (1. La corriente eléctrica. Movimiento de cargas. 2. Ley de Ohm. Resistencia. 3. Balance energético en los circuitos eléctricos: Efecto Joule; generadores y fuerza electromotriz.)

18. EL CAMPO MAGNÉTICO (1. Introducción. 2. Acción de un campo magnético sobre una carga en movimiento: fuerza de Lorentz. Definición del campo magnético B. 3. Ejemplo: movimiento de una carga puntual en un campo magnético uniforme. 4. Acción de un campo magnético sobre un elemento de corriente, sobre una espira y sobre una bobina. Momento magnético de una espira. 5. Acción de un campo magnético sobre un imán. Momento magnético de un imán. Atracción y repulsión magnéticas. 6. Fuentes del campo magnético. Ley de Biot y Savart. 7. Campo magnético creado por una espira, una bobina, un imán, un hilo rectilíneo y indefinido y una carga en movimiento.)

19. ECUACIONES DE MAXWELL Y ONDAS ELECTROMAGNÉTICAS (1. Ecuaciones de Maxwell. Ley de Ampère generalizada. 2. Ondas electromagnéticas. Ecuación de onda. 3. El espectro electromagnético. 4. Generación de ondas electromagnéticas. 5. Estructura atómica de los materiales. 6. Fuentes de luz.)

Documentación y Bibliografía

- Dosieres en soporte papel disponibles en el servicio de reprografía
  - Problemas (enunciados, soluciones y algunos problemas totalmente resueltos) que se utilizan para trabajar en clase
  - Guiones de prácticas que son imprescindibles para preparar y realizar las prácticas en el laboratorio
  - Resúmenes de cada lección e impresión de las presentaciones que se utilizan en el aula (no cubren todo el temario)
- Intranet (campus virtual ATENEA)
  - Presentaciones que se utilizan en el aula (no cubren todo el temario)
  - Cuestionarios test por temas
  - Exámenes de los cursos anteriores con respuestas

- Bibliografía Básica:

  - Tipler P.A.; Mosca, G. FÍSICA. 5ª ed. Barcelona, Reverté , 2005.
  - Kane J.W., Sterheim M.M. Física, 2ª ed., Barcelona, Reverté, 2000.
  - Hewit, P.G. FISICA CONCEPTUAL. 9ª ed. México: Pearson Education, 2004.
  - Direcciones Web de interés
    www.fislab.net
    http://www.sc.ehu.es/sbweb/fisica/default.htm
    Physics Java Applets by C.K.Ng

- Bibliografía Complementaria:

  - Serway R.A.; Jewett, J.W. FÍSICA. 6ª ed. Madrid: International Thomson, 2005.
  - Cutnell, J.D.; Johnson, K. W. FISICA. Méxic: Limusa, 1998.
  - Gettys W.E., Keller F.J., Skove M.J. FÍSICA PARA INGENIERÍA Y CIENCIAS. 2ª ed. México: McGrawhill, 2005.
  - Giancoli, D.C. FÍSICA PARA UNIVERSITARIOS. 3ª ed. México: Pearson Education, 2002.
  - Alonso M., Finn E.J., FÍSICA, México, Addison-Wesley Longman de méxico, 2000.
  - Cromer A.H., FÍSICA EN LA CIENCIA Y EN LA INDUSTRIA, Barcelona, Reverté, 1999.